

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

**Выпуск 659**

2017 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

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 **С.Г. Алёхин**, *кандидат техн. наук, доц.*;  
**Н.Ф. Аверкиев**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Ф. Алексеев**, *доктор техн. наук, доц.*;  
**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*;  
**И.Ю. Еремеев**, *доктор техн. наук, проф.*; **М.А. Еремеев**, *доктор техн. наук, проф.*;  
**А.И. Замарин**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Н. Калинин**, *доктор техн. наук, проф.*;  
**В.В. Клейменов**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.В. Козлов**, *доктор техн. наук, проф.*;  
**Н.С. Кужекин**, *кандидат филос. наук, проф.*; **В.Н. Кузьмин**, *доктор воен. наук, проф.*;  
**Н.Б. Кунтурова**, *доктор пед. наук, доц.*; **А.Г. Ломако**, *доктор техн. наук, проф.*;  
**Г.Н. Мальцев**, *доктор техн. наук, проф.*; **Ю.С. Мануйлов**, *доктор техн. наук, проф.*;  
**Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук*; **А.В. Паршуткин**, *доктор техн. наук, проф.*;  
**Н.А. Репях**, *кандидат филос. наук, доц.*; **А.В. Харченко**, *доктор техн. наук, доц.*;  
**К.Ю. Цветков**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Чарушников**, *доктор воен. наук, проф.*

Адрес:

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

Издание зарегистрировано

Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.

Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы  
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени  
доктора наук (с 01 декабря 2015 г.). Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Ответственный за выпуск:

начальник РИО **С.В. Чернышев**

Техническая поддержка:

**С.И. Кипа**

Подписано к печ. 26.12.2017. Формат печатного листа 445×300/4. Уч.-печ. л. 70,00. Уч.-изд. л. 34,50  
Тираж 50 экз. Заказ 3582/283. Отпечатано в типографии ВКА им. А.Ф. Можайского

**ISSN 2218-5429**

© Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Архангельский А.А.* Объединение математических моделей разнородных процессов на основе кватернионов ..... 6
- Калиниченко С.В., Махров К.Б., Скороходов Я.А.* Модель функционирования и экспериментальные исследования системы автоматической идентификации морских судов ..... 9
- Корчагин П.В., Лебедев А.Н., Лохвицкий В.А., Уланов А.В.* Численный анализ системы с «охлаждением» каналов обслуживания и гиперэкспоненциальным входящим потоком ..... 18

### СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алфёров А.В., Комраков Д.Н., Сквазников М.А.* Алгоритм оценивания состава группировки орбитальных и воздушных средств дистанционного зондирования Земли в задаче съемки площадного объекта... 25
- Бережной И.В., Еремеев И.Ю., Маковский В.Н.* Метод оценивания организованности в задачах мониторинга военно-технических систем ..... 35
- Илларионов Б.В., Малиев Д.С.* Оценка возможности распознавания излучений одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов ... 46

### ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

- Костромитинов А.В., Корыстин А.А., Лебедев А.Б., Прохоренко П.А., Тюленева М.А.* Физико-статистическая модель поля ветра в циклоне на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса .... 55
- Лупанчук В.Ю.* Развитие методов навигационной картографии в задачах определения текущего положения робототехнических комплексов в окружающем пространстве ..... 63

### РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

- Абдурахимов А.А., Барцевич А.В., Карев М.С.* Методика оценивания качества системы управления движением космического аппарата

наблюдения, функционирующего в условиях внешних деструктивных воздействий.....	73
<i>Абсалямов Д.Р., Марченко М.А., Шаповалов Д.В.</i> Энергоресурсосбережение при эксплуатации системы обеспечения температурно-влажностного режима в мощных контейнерных радиолокационных станциях на основе управления структурной схемой системы холодоснабжения .....	83
<i>Аверкиев Н.Ф., Салов В.В., Хасанов А.Ю.</i> Затраты характеристической скорости космического аппарата на совершение маневра с целью изменения периодичности замыкания трассы полета .....	90
<i>Авсеенко А.И., Дорофеев С.А., Кивчун О.Р.</i> Концептуальная модель управления электропотреблением энергетических комплексов на основе оценки потенциала энергосбережения с учетом динамики факторов, влияющих на электропотребление .....	98
<i>Беляев С.А., Миронов Ю.В., Остапченко Ю.Б., Экало А.В.</i> Аппроксимация программы угла тангажа баллистических ракет при полете с заданными конечными условиями .....	105
<i>Вилков А.В., Колесов Д.Г., Найданов А.Ф.</i> Обоснование технического облика системы радиационного наблюдения позиционного района ...	110
<i>Глуханов А.С., Жабровец Е.И., Моторин В.М., Пудиков В.В.</i> Оценивание надежности и экономической эффективности газифицированных котельных установок .....	117
<i>Гончаров П.С., Денисов А.М., Зозуля Л.П., Прохватова И.С.</i> Методика определения угловой скорости и перегрузки космического аппарата в результате столкновения с частицей космического мусора .....	122
<i>Горшков Л.К., Денисов А.М., Мищерякова О.Н., Щербаков В.И.</i> Предельная оценка параметров маневра приведения космической трассовой системы в режим ротации .....	130
<i>Грачёв И.Г., Дёма И.А., Низовцев В.М.</i> Численное моделирование процессов обтекания потоком разогретого газа охлаждаемых элементов конструкции реактивных двигателей летательных аппаратов .....	140
<i>Дашкин Э.Р.</i> Комплексная математическая модель процесса регистрации изображений космических аппаратов в матричных приёмниках с зарядовой связью .....	148

<i>Барцевич А.В., Дашкин Э.Р., Поляков В.В.</i> Реализация способа обнаружения сигналов малоразмерных техногенных объектов в оптико-электронном комплексе специального назначения при параметрической априорной неопределенности .....	156
<i>Каргу Д.Л., Радионов Н.В., Стеганов Г.Б., Чудновский Ю.А., Шубин Д.А.</i> Модель энергопритока от солнечных батарей бортовой системы электроснабжения космического аппарата, стабилизированного вращением .....	164
<i>Петухов А.Б., Сергеев В.А.</i> Методика оценивания технических характеристик звездных датчиков космических аппаратов.....	172
<b>ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК</b>	
<i>Алтухов А.И., Калинин В.Н., Ковнацкий В.К.</i> Экспертный метод оценивания уровня сформированности профессиональных компетенций обучающихся при выполнении лабораторного практикума по физике .....	179
<i>Башикирцев В.П., Касавцев М.Ю.</i> Методика формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности ...	184
<i>Боровиков И.Г., Щербина И.С.</i> Моделирование процесса освоения учебного материала личным составом боевого расчета частей запуска космических аппаратов .....	194
<i>Булекбаев Д.А., Морозов А.В.</i> Формирование и развитие навыков вычислительного эксперимента у обучающихся на примере исследования динамической системы .....	202
<i>Новиков Е.А., Севастьянов Д.А., Топорков И.С., Фадеев А.С., Цветков К.Ю.</i> Учебный тренировочный комплекс подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения .....	210
<i>Осипов Г.К., Хиленко В.В.</i> Методика разработки тестовых заданий для оценки сформированности профессиональных компетенций у курсантов высших военно-учебных заведений .....	219
<i>Стешов А.В.</i> Метамоделю педагогической речевой коммуникации .....	232



## ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

<i>Гуторович О.В.</i> Проблема «человек в науке». Человек науки .....	240
<i>Казакова И.Б.</i> Уголовно-правовая характеристика умышленного уничтожения или повреждения военными военнослужащими военного имущества .....	251
Рефераты статей .....	261
Сведения об авторах .....	269
Сведения о рецензентах .....	276

А.А. Архангельский,  
кандидат техн. наук

## ОБЪЕДИНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗНОРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ КВАТЕРНИОНОВ

В статье рассматривается формирование сложных математических моделей разнородных процессов, полученных в виде интегральных преобразований, на основе использования операции расширения комплексной переменной.

Ключевые слова: математические модели, интегральное преобразование, комплексная переменная, кватернион.

### ВВЕДЕНИЕ

Математические подходы к описанию взаимодействия двух случайных процессов прошли несколько этапов:

– сначала эти описания опирались на средние значения процессов, что позволяло использовать устойчивую характеристику случайного процесса;

– следующим шагом было использование среднего значения и дисперсии, это давало хорошие результаты при аппроксимации произвольных распределений нормальным распределением;

– в дальнейшем при использовании интегральных преобразований появилась возможность получать решения на основе функции плотности распределения вероятностей (ПРВ) [1, 2].

Статья посвящена объединению математических моделей разнородных процессов, полученных в виде преобразования Лапласа (ПЛ) и преобразования Фурье (ПФ), на основе использования операции расширения (удвоения) комплексной переменной и перехода к кватернионной переменной, состоящей из четырех элементов. Объединение моделей важно для учета влияния процессов, которые имеют различную физическую природу.

Актуальность темы определяется необходимостью объединения моделей разнородных процессов, полученных на основе интегральных преобразований, в единое математическое выражение. Существо такого подхода заключается в том, что появляется возможность объединения вероятностных моделей на основе ПЛ ПРВ, взятых из других областей, где они подробно разработаны.

### КВАТЕРНИОНЫ И ИХ СВОЙСТВА

Описание взаимодействия процессов, математически представляемых парой ПЛ ПРВ комплексной переменной, осуществляется на основе кватернионов [3].

Кватернионы представляют собой числа вида

$$q = a + bi + cj + dk, \quad (1)$$

где  $i, j, k$  являются векторами, реализующими поворот, в соответствующих плоскостях.

Парные произведения чисел  $i, j, k$  определяются следующими соотношениями:

$$i^2 = -1, \quad j^2 = -1, \quad k^2 = -1; \quad (2)$$

$$ij = k, \quad jk = i, \quad ki = j; \quad (3)$$

$$ji = -k, \quad kj = -i, \quad ik = -j. \quad (4)$$

Из соотношений видно, что для своей плоскости каждый из векторов обладает свойствами вектора поворота, аналогичными вектору  $i$  (мнимая единица) для плоскости  $XU$ . Умножение на  $i$  соответствует повороту на угол  $\pi/4$  в плоскости  $XU$ . Для кватернионов соблюдаются некоторые условия, верные для комплексных чисел: умножение кватернионов обладает сочетательным (ассоциативным) свойством; кватернионы являются системой с делением; возможно представление кватерниона в тригонометрической форме на основе разделения действительной и мнимой частей, но при изменении порядка кватернионов при умножении, в общем случае, получаются различные результаты.

Существуют различные формы записи кватернионов, одно из представлений кватерниона можно реализовать на основе процедуры удвоения комплексных чисел.

Произвольный кватернион

$$q = a + bi + cj + dk,$$

на основе соотношения  $ij = k$  можно представить в виде:

$$q = (a + bi) + (c + di)j, \quad (5)$$

$$q = z_1 + z_2j. \quad (6)$$

Такое представление позволяет объединить две разные функции комплексной переменной в виде кватерниона и осуществлять действия, не меняя их первоначальную структуру, ПЛ ПРВ на основе комплексной переменной.

## ОБЪЕДИНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

В выражении для записи кватерниона  $q = z_1 + z_2j$  в качестве  $z_1, z_2$  могут быть подставлены интегральные преобразования от функции комплексной переменной, например, преобразования Лапласа или Фурье. Это дает возможность привлечь хорошо разработанный математический аппарат интегральных преобразований функции комплексной переменной и использовать результаты, полученные этим способом, в математическом описании процессов, объединенных на основе кватерниона.

Выражение, включающее в себя ПЛ ПРВ  $L_1(s)$  и  $L_2(s)$ , примет вид

$$L_{12}(q) = z_1 + z_2j = L_1(s) + [L_2(s)]j. \quad (7)$$

Известно, что для нахождения преобразования Лапласа независимых случайных процессов, которые взаимодействуют между собой, достаточно перемножить преобразования Лапласа отдельных случайных процессов.

При такой подстановке преобразование Лапласа от кватернионной переменной можно выразить через преобразования Лапласа от комплексной переменной. Тогда выражения сомножителей примут вид:

$$\begin{aligned} L_{12}(q) &= z_1 + z_2j = L_1(s) + [L_2(s)]j, \\ L_{34}(q) &= z_3 + z_4j = L_3(s) + [L_4(s)]j. \end{aligned} \quad (8)$$

Результат перемножения таких выражений показан ниже:

$$\begin{aligned} L_5(q) &= L_{12}(q) L_{34}(q) = \{L_1(s) + [L_2(s)]j\} \{L_3(s) + [L_4(s)]j\} = \\ &= L_1(s) L_3(s) + L_1(s)[L_4(s)]j + [L_2(s)]j L_3(s) + [L_2(s)]j[L_4(s)]j = \\ &= L_1(s) L_3(s) - L_2(s) \overline{L_4(s)} + L_1(s)[L_4(s)]j + L_2(s) \overline{L_3(s)}j. \end{aligned} \quad (9)$$

Похожие результаты можно получить при использовании функций двух комплексных переменных [4, 5].

Полученное выражение при  $L_2(s) = 0$  и  $L_4(s) = 0$  приводит к известной формуле, определяющей перемножение ПЛ ПРВ для независимых процессов.

Использование данного подхода описано в работе [6] на примере анализа системы передачи абонентской и служебной информации.

Математическая модель, позволяющая при описании процесса передачи абонентской информации учесть влияние процесса аутентификации [7], примет вид

$$L_{12}(q) = L_1(s) + [L_2(s)]j. \quad (10)$$

Полученное выражение сохраняет формы исходных ПЛ ПРВ и при отсутствии процесса аутентификации ( $L_2(s) = 0$ ) получается функция комплексной переменной, соответствующая процессу передачи абонентской информации.

В такой форме записи возможно объединение интегральных преобразований Лапласа (ПЛ-ПЛ) и Фурье (ПФ-ПФ) и смешанных форм (ПЛ-ПФ и ПФ-ПЛ). Это допустимо, поскольку преобразование Фурье можно представить в виде мнимой части преобразования Лапласа при разложении на действительную и мнимую составляющие.

Использование таких комбинированных моделей возможно при рассмотрении процессов передачи различных видов информации, абонентской, служебной, (ПЛ-ПЛ); при дополнительном введении процессов надежности аппаратуры (передача абонентской информации с учетом влияния процессов изменения надежности аппаратуры) (ПЛ-ПЛ); при совместном рассмотрении работы волновода и излучателя (ПЛ-ПФ) и т.д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье содержится решение теоретической проблемы создания сложных моделей из моделей отдельных независимых процессов, которые имеют вид интегральных преобразований. Подход к формированию моделей на основе кватернионов через операцию удвоения позволяет сохранить исходную форму записи на основе комплексной переменной и использовать множество моделей, полученных ранее в виде интегральных преобразований.

## Список используемых источников

1. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
2. *Клейнрок Л.* Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
3. *Кантор И.Л., Солодовников С.С.* Гиперкомплексные числа. – М.: Наука, 1973. – 142 с.
4. *Смышляева Л.Г.* Преобразование Лапласа функций многих переменных. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 141 с.
5. *Диткин В.А., Прудников А.П.* Операционное исчисление. – М.: Высш. шк., 1975. – 407 с.
6. *Архангельский А.А.* Математическая модель процесса обработки пакетов с использованием протокола RSVP на основе системы кватернионов // Труды учебных заведений связи. – СПб.: СПбГУТ, 2005. – Вып. № 173. – С.61–66.
7. *Архангельский А.А., Грязнова К.С.* Исследование процесса аутентификации для системы информационной безопасности ведомственной информационной сети // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 654. – С.103–111.

С.В. Калиниченко,  
*кандидат техн. наук;*  
К.Б. Махров;  
Я.А. Скороходов,  
*кандидат техн. наук*

## **МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ**

В статье представлены модель функционирования космической системы контроля движения морских судов и результаты экспериментальных исследований надводной радиочастотной обстановки (на примере сигналов автоматической идентификационной системы) с использованием авиационного макета бортовой специальной аппаратуры. Основными задачами эксперимента являлись отработка современных технологий приема, регистрации и обработки радиосигналов и верификация модели функционирования космической системы автоматической идентификации морских судов.

Ключевые слова: автоматическая идентификационная система, обработка информации, имитационное моделирование, экспериментальные исследования.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время актуальным и востребованным является создание системы глобального слежения за перемещением морских судов [10, 11]. Одним из способов, позволяющих обеспечить глобальность и непрерывность контроля движения морских судов, является развертывание орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) с возможностью приема, обработки и ретрансляции сообщений автоматической идентификационной системы (АИС) [1, 2, 6, 9].

В Военно-космической академии были разработаны модели и методики оценивания целевых показателей функционирования систем идентификации и определения местоположения морских судов [5], а также макет бортовой специальной аппаратуры (БСА) приема и обработки сигналов АИС. Применение программно-реализованных имитационных моделей позволяет получать оценки целевых показателей функционирования распределенных систем идентификации и определения местоположения морских судов с учетом различных пространственных и энергетических факторов и условий распространения радиосигналов, а также реального размещения контролируемых объектов в акватории Мирового океана и в прибрежных зонах (модель надводной радиоэлектронной обстановки включает свыше 500 тыс. морских судов) [4].

Адекватность моделей подтверждается статистически незначимым отличием полученных с использованием имитационного моделирования оценок среднего количества обнаруженных объектов наблюдения от результатов аналитических выражений, предложенных другими авторами [3, 5, 8]. К сожалению, аналитические выражения предполагают существенные допущения и ограничения, в частности, не учитывают неоднородность расположения судов в зоне обзора КА, что может привести к ошибочным решениям при проектировании системы. Имитационная модель позволяет задавать различные ограничения и допущения (модель распределения источников излучений, модель планирования задействования слотов для передачи сообщений, модель канала распространения сигналов) и получать оценки целевых показателей функционирования космической системы (КС) в условиях, максимально приближенных к действительности.

## МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ

В обобщенном виде состав и элементы модели функционирования системы автоматической идентификации морских судов представлены на рис. 1 [5].



*Рис. 1. Состав модели функционирования системы автоматической идентификации морских судов*

Элементами рассматриваемой модели являются частные модели: модель надводной радиоэлектронной обстановки (распределения источников излучений АИС), модели распределенных систем пунктов приема сообщений, включая модель орбитальной группировки (ОГ) КА, баллистические модели, модель канала передачи информации и модели распределения сигналов АИС.

Представленная модель может быть использована для решения следующих задач:

- оценивания количественных показателей обнаружения судов для заданной структуры ОГ КА (местоположений наземных пунктов);
- выбора параметров ОГ КА (сети наземных пунктов) для заданных показателей обнаружения морских судов;
- оценивания энергетической доступности сигналов для различных параметров орбитального движения КА (местоположений наземных пунктов) и других условий (с учетом различных допущений и ограничений при моделировании) [4].

С целью верификации предлагаемой модели и оценивания энергетической доступности сигналов и влияния на безошибочный прием сообщений других факторов проводился натуральный эксперимент с использованием авиационного макета БСА приема и обработки сигналов АИС.

## **АВИАЦИОННЫЙ МАКЕТ БОРТОВОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Макет БСА представляет собой комплекс программных и аппаратных средств, состоящий из трех каналов приема информации (в каждый из которых входит микрокомпьютер и программно-конфигурируемый приемник), запоминающего устройства (твердотельного накопителя), приемника сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), набора фильтров – усилителей и антенн, дисплея, а также общего и специального программного обеспечения регистрации и демодуляции радиосигналов автоматической идентификационной системы (АИС).

Макет БСА предназначен для регистрации радиосигналов АИС на частотах 161,975 и 162,025 МГц, декодирования сообщений АИС с привязкой к текущим координатам наземного пункта или навигационным параметрам летно-подъемного средства (ЛПС) и времени приема и визуализации местоположения обнаруженных морских судов на карте земной поверхности.

Макет позволяет осуществлять прием и декодирование сообщений АИС с отображением результатов обработки и обнаруженных объектов в режиме реального времени и производить запись радиосигналов в полосе 2,4 МГц с центральной частотой 162,050 МГц с возможностью ее дальнейшего детального анализа.

Использование в макете современных технологий приема и обработки информации – программно-конфигурируемых радиоприемных устройств и микрокомпьютеров – обеспечивает возможность оперативного изменения алгоритмов работы радиоприемного устройства (РПУ), числа каналов и видов обрабатываемых сигналов. Малая масса и габариты и возможность автономного питания позволяют применять макет для натуральных экспериментов на стационарных пунктах контроля или на летно-подъемных средствах (самолетах, беспилотных летательных аппаратах).

### **ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАКЕТА БОРТОВОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

Цель экспериментальных исследований (ЭИ) – оценить потенциальные возможности приема и регистрации сигналов и декодирования сообщений АИС в сложных условиях и сигнально-шумовой обстановке при различных конфигурациях макета.

В процессе эксперимента решались следующие задачи:

- практическая оценка характеристик радиоэлектронной обстановки, создаваемой надводными РЭС (на примере АИС) в интересах подготовки исходных данных и обоснования тактико-технических требований для проектируемых опытных образцов специальной техники;
- экспериментальная проверка технологий цифрового приема и регистрации радиосигналов с помощью макета БСА в наземных и летных условиях его испытаний;
- верификация имитационной модели функционирования космической системы контроля движения морских судов путем сравнения полученных экспериментальных значений целевых показателей функционирования систем идентификации и определения местоположений морских судов, в частности количества переданных сообщений судами в заданном территориальном районе, количества безошибочно принятых сообщений, количества обнаруженных объектов за заданный интервал времени с результатами имитационного моделирования.

Эксперимент проводился в три этапа. Первый этап включал проверку работоспособности всех составных частей макета и оценивание технических характеристик радиоприемного устройства. На втором этапе проводилась запись радиосигналов на стационарных наземных

пунктах и на ЛПС в различных режимах и конфигурациях макета. Обработка полученных экспериментальных данных и анализ результатов составляли суть третьего этапа.

## ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

**Чувствительность и динамический диапазон.** Оценивание технических характеристик РПУ проводилось с использованием испытательного стенда, состоящего из генератора сигналов, цифрового осциллографа и регулируемого аттенюатора. Методика, в соответствии с которой измерялись технические характеристики РПУ, представлена на рис. 2. С учетом установленного коэффициента усиления встроенного МШУ 12,5 дБ, измеренная чувствительность РПУ составила  $-78$  дБм, при этом встроенный МШУ имеет запас усиления 48 дБ, что позволяет добиться требуемой чувствительности  $-107$  дБм, установленной нормативными документами для приемников АИС. Измеренное аналогичным образом значение динамического диапазона составляет 66 дБ.

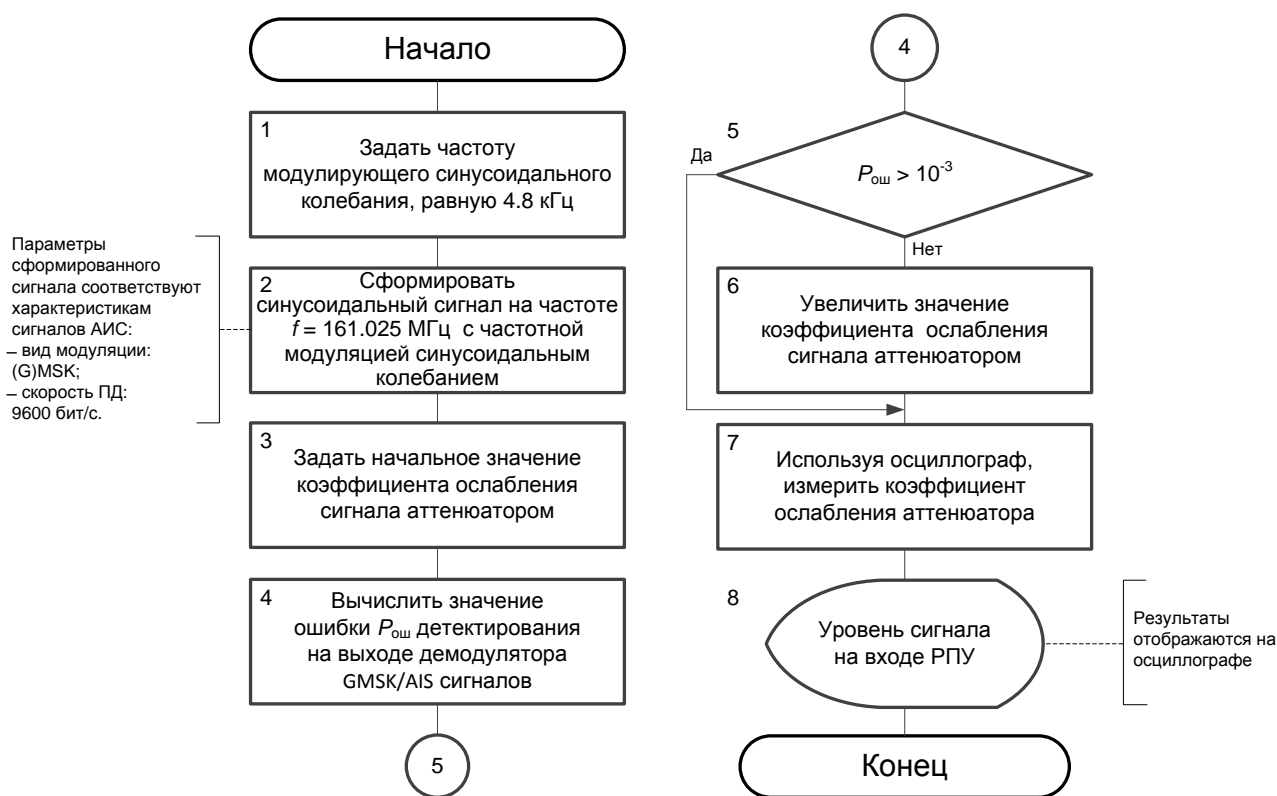


Рис. 2. Методика оценивания чувствительности РПУ

**Точность шкалы времени.** Поскольку запись радиосигналов ведется с частотой дискретизации 2,4 МГц, то после выделения комплексных огибающих на частотах АИС ( $f_1 = 161,975$  МГц и  $f_2 = 162,025$  МГц) с частотой дискретизации 48 кГц, требуемой для устойчивой работы демодулятора, максимальное разрешение шкалы времени составляет приблизительно 21 мкс.

В макете системное время синхронизировалось по сигналам ГНСС. Производилась оценка систематической и случайной погрешностей привязки момента начала кадра АИС к внутреннему времени макета. На рис. 3,а изображен временной ряд значений смещения начала кадра относительно слотов передачи сообщений.



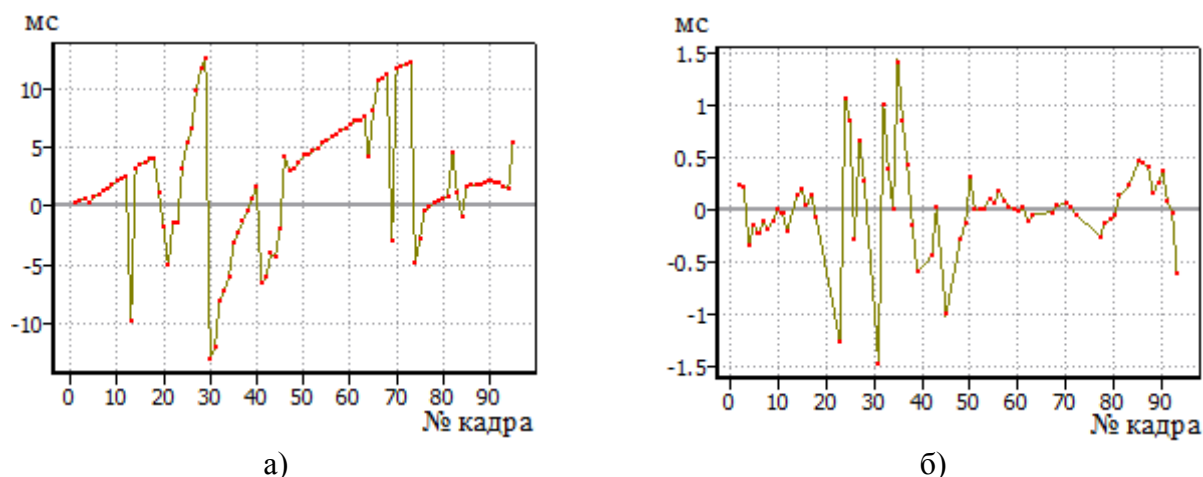


Рис. 3. К оцениванию точности шкалы времени:  
 а – временной ряд значений смещения момента начала кадра АИС  
 относительно слотов передачи сообщений; б – регрессионные остатки  
 последовательности значений смещения начала кадра

Видно, что на графике присутствует тренд, обусловленный нестабильностью частоты тактового генератора РПУ. После удаления систематической составляющей, аппроксимированной моделями линейной регрессии, и аномальных измерений (рис. 3,б), оценка среднеквадратического отклонения момента времени привязки начала кадра составляет приблизительно 400 мкс.

## ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА БОРТОВОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

ЭИ выполнялись в реальной помеховой обстановке в наземных и летных условиях. Во время полета ЛПС прием радиосигналов осуществлялся на высоте до 3 км над районами сосредоточения морских судов (районы Финского залива и Черного моря).

Принятый оцифрованный сигнал делился на кадры АИС длительностью 60 с и записывался на твердотельный накопитель. Точность определения времени начала кадров достигалась с использованием секундных импульсов с выхода приемника сигналов ГНСС, подключенного через последовательный интерфейс к микрокомпьютеру.

В ходе эксперимента проводилась обработка различных конфигураций макета, в частности, с подключением различных комбинаций антенн (коаксиального полуволнового вибратора и рамочного полуволнового вибратора), а также режекторных фильтров, имеющих диапазон 88–108 МГц, и дополнительных фильтров – усилителей на 162 МГц при различных значениях усиления встроенного малошумящего усилителя от 20 до 40 дБ с шагом, равным 2 дБ. При наземных испытаниях высота расположения антенн составляла 4 м, на борту ЛПС штыревая антенна закреплялась вертикально снаружи фюзеляжа, рамочная антенна – на иллюминатор одного из бортов внутри фюзеляжа с учетом наибольшей концентрации источников излучений АИС.

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные данные представляют собой оцифрованные записи (комплексные 8-битные отсчеты) радиосигналов с центральной частотой  $f_0 = 162,050$  МГц и шириной полосы  $\omega = 2,4$  МГц, содержащих сообщения АИС, в виде двоичных файлов, а также результаты

демодуляции и декодирования сообщений в виде текстовых файлов, полученные при различных конфигурациях приемного оборудования.

Обработка и анализ записей зарегистрированных радиосигналов проводились с использованием разработанного специального программного обеспечения (СПО). Функциональными возможностями СПО являются:

- чтение бинарных файлов, содержащих отчеты зарегистрированных радиосигналов, представленных различными типами данных (целочисленными 8-, 16-, 32-разрядными, с плавающей точкой);

- графическое отображение во временной области синфазной и квадратурной составляющих радиосигналов, представленных в комплексной форме, а также их модуля;

- вычисление спектральной плотности мощности радиосигналов на заданном интервале и графическое отображение частотно-временной развертки с заданной шириной окна дискретного преобразования Фурье (ДПФ);

- выделение комплексной огибающей сигналов, смещенных относительно центральной частоты анализируемого полосового радиосигнала.

На рис. 4,а изображена частотно-временная развертка сигнала, записанного на ЛПС в районе Финского залива, с центральной частотой  $f_0 = 162,050$  МГц и шириной полосы  $\omega = 2,4$  МГц длительностью 1 с и шириной окна дискретного преобразования Фурье  $0,42(6)$  мс (1024 отчета), анализ которой позволяет выделить как помехи, распределенные по всей полосе частот (белый шум), так и помехи, сконцентрированные на определенных частотах (паразитные излучения бортовой аппаратуры ЛПС и излучение обзорных радиолокаторов аэродрома), что в целом говорит о сложной сигнально-шумовой обстановке. На частотах, смещенных относительно центральной частоты  $f_0$  на  $-25$  кГц и  $-75$  кГц, также отчетливо видны сигналы АИС.

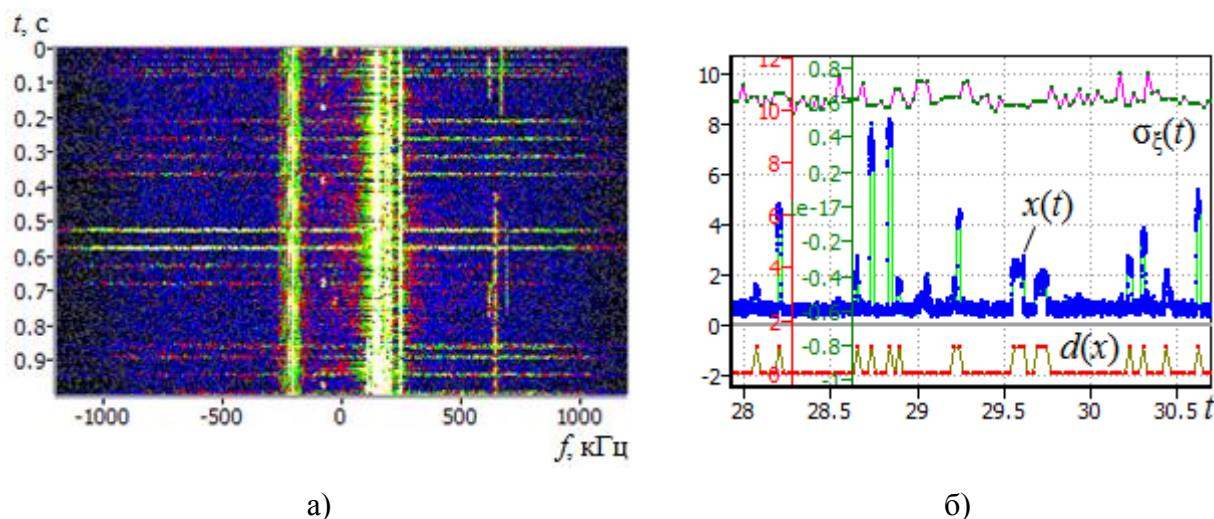


Рис. 4. Анализ оцифрованного радиочастотного сигнала:  
а – частотно-временная развертка; б – энергетический обнаружитель

Определение количества переданных сигналов АИС выполнялось с использованием «плавающего» порогового значения отношения сигнал/шум на анализируемом интервале времени, адаптирующегося к текущему уровню энергии  $\sigma_{\xi}(t)$  шума. На рис. 4,б изображены амплитуда отфильтрованного сигнала на частоте  $f_1 = 161,975$  МГц и шириной  $\omega = 9,6$  кГц, график текущего значения энергии  $\sigma_{\xi}(t)$  шума и решающая функция  $d(x)$ , принимающая значение 1, если в слоте есть сигнал, иначе 0.

Количество безошибочно принятых сообщений оценивалось по результатам работы программно реализованного демодулятора GMSK и декодера АИС сообщений. Определены за-

висимости числа декодированных сообщений от значения коэффициента усиления МШУ при различных конфигурациях макета БСА в наземных и летных условиях его эксплуатации.

Анализ полученных зависимостей показал, что направленные свойства рамочного вибратора обуславливают значительное увеличение числа принимаемых сообщений АИС при малых значениях коэффициента усиления встроенного МШУ приемника по сравнению с коаксиальным полуволновым вибратором. При подключении режекторного фильтра диапазона 88–108 МГц наблюдается существенное увеличение числа принятых сообщений. Перегрузка входного МШУ сигналами вещательных радиостанций УКВ диапазона вызывает снижение количества детектированных сообщений при значениях коэффициента усиления выше 35 дБ. Для рамочной антенны данный эффект проявляется в меньшей степени вследствие ее узкополосности. Подключение как режекторного фильтра, так и усилителя на 162 МГц обеспечивает наибольшее количество принятых сообщений АИС за период испытаний.

### ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАКЕТА БСА

Одной из задач экспериментальных исследований являлась верификация модели функционирования космической системы автоматической идентификации морских судов [5]. Проверялись статистические гипотезы о равенстве значений количества переданных сигналов, количества безошибочно принятых сообщений и количества обнаруженных судов за период проведения эксперимента с соответствующими характеристиками, полученными с использованием имитационного моделирования.

По результатам анализа записей, выполненных за время проведения эксперимента в районе Финского залива, было зафиксировано по критерию превышения энергии в слоте заданного порогового значения сигнал/шум 18661 сигнал АИС, безошибочно детектировано 9440 сообщений.

Количество морских судов, находившихся в зоне видимости ЛПС, определялось как количество оригинальных MMSI (от англ. *Maritime mobile service identity* – идентификационный номер судовой или береговой станции). Таким образом, по результатам декодирования сообщений было обнаружено 246 судов.

Экспериментально полученная зависимость количества  $n$  обнаруженных судов от времени  $t$  наблюдения изображена на рис. 5. Разрывы на графике обусловлены переключениями режимов работы аппаратуры, а также перерывами между полетами.

Общая продолжительность наблюдения составляет около 90 мин. Отображение местоположений обнаруженных объектов на картографической основе представлено на рис. 6. Максимальная дальность обнаружения составляет приблизительно 500 км.

Результаты моделирования при вышеперечисленных условиях (приемник считался неподвижным и расположенным на высоте  $h = 3$  км, распределение судов по их динамическим характеристикам и, соответственно, интервалам передачи сообщений также оценивалось экспериментально) следующие:

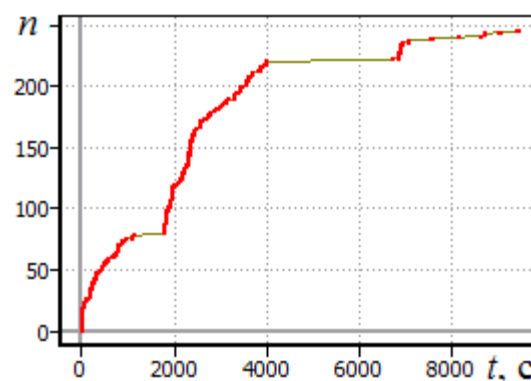


Рис. 5. Экспериментальная зависимость количества обнаруженных объектов от времени наблюдения

– количество переданных сообщений находится в интервале [16310; 23176] с доверительной вероятностью  $p = 95\%$ ;

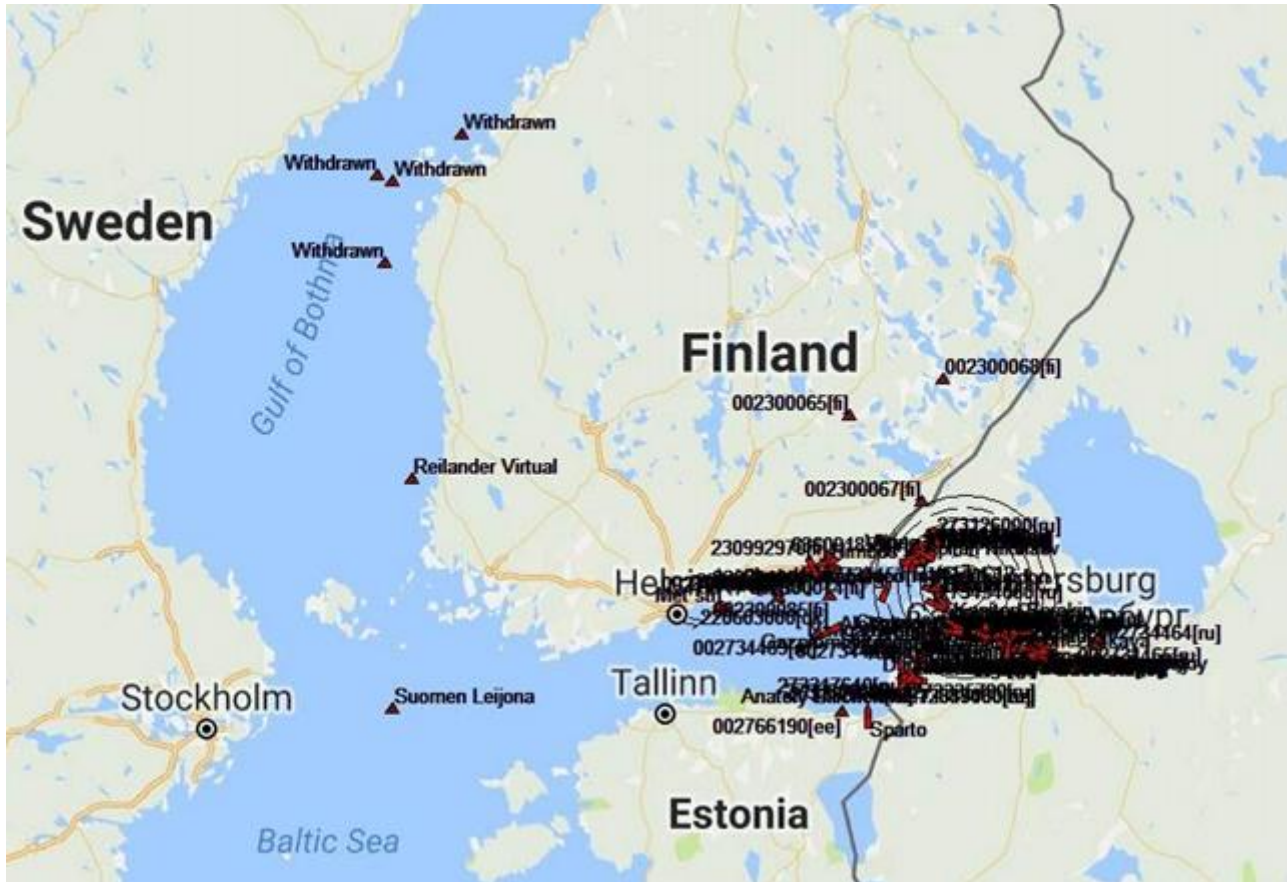


Рис. 6. Визуализация местоположения обнаруженных объектов

– количество безошибочно принятых сообщений – в интервале [16247; 22448] с доверительной вероятностью  $p = 95\%$ ;

– количество обнаруженных судов за время моделирования составило 246.

Значения количества переданных сообщений АИС, полученные с использованием имитационной модели [5], статистически незначимо отличаются от значений соответствующих характеристик в условиях реальной надводной обстановки. В то же время количество безошибочно принятых сообщений существенно отличается от соответствующей характеристики, полученной в результате моделирования. Это обусловлено неидеальностью демодулятора (в моделировании принимается идеальная зависимость вероятности безошибочного приема сообщений от уровня сигнал/шум для некогерентного демодулятора), сложной шумовой обстановкой в зоне аэродрома и электромагнитным излучением бортовой аппаратуры ЛПС. Перечисленные факторы снижают вероятность безошибочного приема сообщений.

При использовании в качестве исходных данных в моделировании экспериментально полученной зависимости вероятности ошибки от значения сигнал/шум количество детектированных сообщений отличается от экспериментального, статистически незначимо. В целом результаты эксперимента подтверждают адекватность модели и возможность ее применения для расчета показателей функционирования систем автоматической идентификации морских судов.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований, посвященных контролю движения морских судов с использованием макета бортовой специальной аппаратуры приема и обработки сигналов АИС. Разработанный макет БСА в рамках проводимых исследований испытан в реальной сложной сигнально-шумовой обстановке и подтвердил целесообразность применения реализованных технологий построения информационно-измерительных систем и алгоритмов обработки информации в перспективных образцах специальной техники.

Макет БСА имеет малую массу и габариты, а также возможность автономной работы без внешних источников питания, что позволяет использовать его на летно-подъемных средствах (самолетах, беспилотных летательных аппаратах).

Направлениями дальнейших исследований являются:

– модернизация аппаратного обеспечения макета в части расширения диапазона частот и динамического диапазона радиоприемного устройства, подключения антенно-фидерных устройств для приема сигналов спутниковых радиолиний;

– совершенствование программного обеспечения макета в части разработки алгоритмов обработки широкополосных радиосигналов с использованием технологии массово-параллельных вычислений.

## Список используемых источников

1. *Андреев А.М.* Анализ развития спутниковой автоматической идентификационной системы мониторинга движения судов. Ч. 2. Средства мониторинга // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652. – С. 7–15.
2. *Кузнецов А.М., Романов А.А., Романов А.А.* Моделирование приема коллизий сигналов АИС на борту КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2015. – Вып. 1, т. 2. – С. 25–36.
3. Отчет МСЭ-R М.2084. Обнаружение сообщений системы автоматической идентификации с помощью спутников. – URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2084-2007-PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2084-2007-PDF-R.pdf) (дата обращения: 17.09.2016).
4. *Скорыходов Я.А., Малышев Д.В.* Анализ энергетической доступности сигналов системы АЗН-В для низкоорбитальных космических аппаратов с использованием статистического моделирования // Информация и космос. – 2017. – № 4. – С. 137–141.
5. *Скорыходов Я.А., Махров К.Б., Малышев Д.В.* Имитационная модель функционирования космической системы контроля движения морских судов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 657. – С. 23–33.
6. Технические характеристики системы автоматической идентификации, использующей многостанционный доступ с временным уплотнением каналов в полосе ОБЧ морской подвижной службы / Международный союз электросвязи. – URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-4-201004-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-4-201004-S!!PDF-R.pdf) (дата обращения: 10.09.2016).
7. *Chen Y.* Detection probability analysis of space-Based AIS signal by using geometrical model // Journal of Shipping and Ocean Engineering. – New York, 2014. – Vol. 4. – P. 161–171.
8. *Dembovskis A.* AIS message extraction from overlapped AIS signals for SAT-AIS applications: dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften – Dr. rer. nat. – 2015. – 137 p.
9. Space-based AIS for global maritime traffic monitoring / G. Hoye, T. Eriksen, B.J. Meland, and G. Narheim // Acta Astronautica. – London, 2008. – Vol. 62. – P. 240–245.
10. Marine Traffic. – URL: <https://www.marinetraffic.com/ru> (дата обращения: 05.11.2016).
11. VesselFinder. – URL: <https://www.vesselfinder.com> (дата обращения: 05.11.2016).

П.В. Корчагин,  
кандидат техн. наук;  
А.Н. Лебедев;  
В.А. Лохвицкий,  
кандидат техн. наук;  
А.В. Уланов,  
кандидат техн. наук

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ С «ОХЛАЖДЕНИЕМ» КАНАЛОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ И ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМ ВХОДЯЩИМ ПОТОКОМ

Рассматривается многоканальная система массового обслуживания с «охлаждением», в которой приходящие во время охлаждения заявки накапливаются и ожидают, пока система не перейдет в режим обслуживания. Предложена диаграмма переходов между микросостояниями системы с гиперэкспоненциальным входящим потоком, экспоненциальным обслуживанием и экспоненциальным охлаждением. Получено распределение числа заявок и преобразование Лапласа – Стилтеса времени ожидания.

Ключевые слова: системы массового обслуживания с «охлаждением»; немарковские системы массового обслуживания; гиперэкспоненциальное распределение; численные методы.

### ВВЕДЕНИЕ

При моделировании военно-технических систем методами теории массового обслуживания иногда необходимо учитывать ситуации, когда после полного освобождения системы от заявок требуется проведение мероприятий, связанных с восстановлением работоспособности, проведением технического обслуживания, перерывами в работе и т.д. В этом случае уместно говорить, что в момент окончания периода непрерывной занятости система массового обслуживания (СМО) переходит в режим «охлаждения», в котором на некоторое время прекращается обслуживание вновь прибывших заявок. Время охлаждения в общем случае является случайной величиной. Системы с «охлаждением» можно считать частным случаем известного в теории массового обслуживания класса СМО с «прогулками» обслуживающих приборов.

В одной из работ по анализу данных СМО, в статье [1], рассматривалась марковская система с экспоненциальным охлаждением. В нотации Кендалла такую систему можно обозначить как  $M/M/n-M$ , где через дефис указывается закон распределения времени охлаждения. В работе [2] анализировалась СМО с простейшим входящим потоком, марковским обслуживанием и гиперэкспоненциальным второго порядка ( $H_2$ ) распределением охлаждения  $M/M/n-H_2$ . В статье [3] рассмотрена система с марковским охлаждением и обобщенным распределением Эрланга второго порядка интервалов между заявками входящего потока  $M/M/n-E_2$ . Указанное распределение характеризует случайные величины с коэффициентом вариации  $\nu \in [0,7; 1)$ .

Однако в современных исследованиях информационно-телекоммуникационных сетей показано, что трафик в них обладает сложной структурой и не всегда может быть адекватно представлен пуассоновским потоком, для которого коэффициент вариации интервалов между заявками входящего потока  $\nu = 1$ . В статье представлены результаты применения  $H_2$ -распределения, позволяющего аппроксимировать распределения с произвольным коэффициентом вариации интервалов между заявками входящего потока, для анализа СМО с охлаждением  $H_2/M/n-M$ .

### МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ $H_2/M/n-M$

Рассмотрим модель многоканальной СМО с «охлаждением» типа  $H_2/M/n-M$ . Гиперэкспоненциальный ( $H_2$ ) входящий поток можно интерпретировать как поток с вероятностным альтернированием: с вероятностью  $u_1$  новая заявка придет в систему через случайный интервал времени, распределенный по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda_1$ , а с вероятностью  $u_2 = (1 - u_1)$  – через интервал, распределенный по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda_2$ . Диаграмма переходов между состояниями марковского процесса, описывающего систему  $H_2/M/n-M$ , представлена на рис. 1.

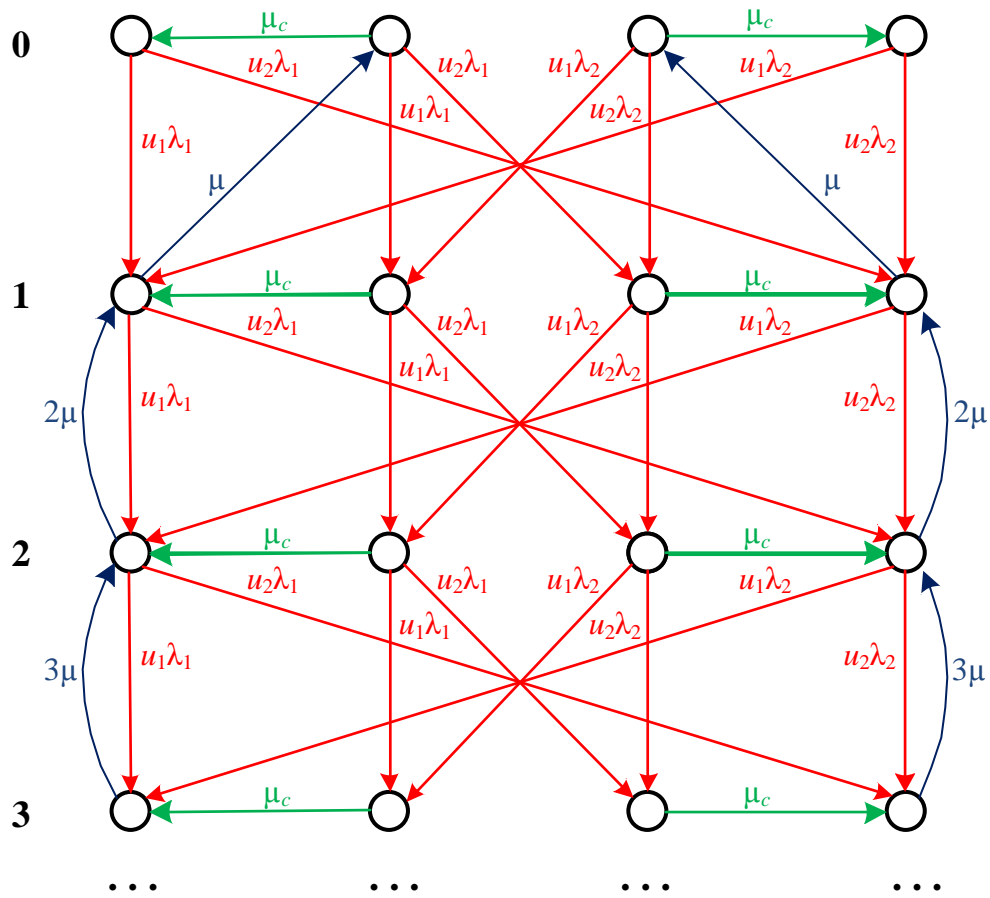


Рис 1. Диаграмма переходов для системы с охлаждением  $H_2/M/n-M$

Полужирный столбец слева указывает номер яруса диаграммы и соответствует числу заявок в системе. На каждом ярусе система находится в одном из четырех микросостояний. Такое количество микросостояний на ярусе обусловлено тем, что система находится в двух режимах – либо обслуживания, либо охлаждения, при этом независимо от данного режима входящий поток характеризуется двумя состояниями, определяющими текущую интенсивность прибытия заявки из  $H_2$ -потока.

На представленной диаграмме две внутренние вертикальные ветви соответствуют режиму охлаждения, две крайние – режиму обслуживания. С вероятностью  $u_1$  интенсивность прибытия новой заявки будет равна  $\lambda_1$ , с вероятностью  $u_2$  упомянутая интенсивность будет равна  $\lambda_2$ . При завершении режима охлаждения система с интенсивностью  $\mu_c$  переходит в микросостояние, соответствующее режиму обслуживания. По завершению обслуживания система переходит на вышележащий ярус с интенсивностью  $\min(j, n)\mu$ , где  $j$  – номер яруса,  $n$  – число каналов обслуживания. Переходы по завершению обслуживания и охлаждения не влияют на

интенсивность прибытия следующей заявки. При полной занятости (на ярусах с номерами  $j \geq n$ ) диаграмма стабилизируется.

Следующими этапами численного расчета СМО являются построение на основе диаграммы матриц интенсивностей инфинитезимальных переходов и решение векторно-матричных уравнений баланса.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Обозначим через  $S_j$  множество всех возможных микросостояний системы, при которых на обслуживании находится ровно  $j$  заявок, а через  $\sigma_j$  – количество элементов в  $S_j$ . Далее, в соответствии с диаграммой переходов построим матрицы интенсивностей инфинитезимальных переходов [4]:

$A_j[\sigma_j \times \sigma_{j+1}]$  – в  $S_{j+1}$  (по прибытию заявок);

$B_j[\sigma_j \times \sigma_{j-1}]$  – в  $S_{j-1}$  (по завершению обслуживания);

$C_j[\sigma_j \times \sigma_j]$  – в  $S_j$  (по завершению охлаждения);

$D_j[\sigma_j \times \sigma_j]$  – ухода из микросостояний  $j$ -го яруса (диагональная матрица).

В квадратных скобках здесь и далее указывается размер матриц. Элемент  $(i, k)$  любой из этих матриц представляет интенсивность перехода из  $i$ -го состояния  $j$ -го яруса в  $k$ -е состояние смежного (по переходам рассматриваемого типа) яруса.

Для СМО  $H_2/M/M/n$  матрицы переходов будут иметь следующий вид:

$$A_0 = A_j = \begin{bmatrix} \lambda_1 u_1 & 0 & 0 & \lambda_1 u_2 \\ 0 & \lambda_1 u_1 & \lambda_1 u_2 & 0 \\ 0 & \lambda_2 u_1 & \lambda_2 u_2 & 0 \\ \lambda_2 u_1 & 0 & 0 & \lambda_2 u_2 \end{bmatrix};$$

$$B_j = \begin{bmatrix} 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 \end{bmatrix}; B_j = \begin{bmatrix} \min(j, n)\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \min(j, n)\mu \end{bmatrix}; C_0 = C_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_0 = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 + \mu_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 + \mu_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}, D_j = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \min(j, n)\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 + \mu_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 + \mu_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_2 + \min(j, n)\mu \end{bmatrix}, j = \overline{1, R}.$$

Введем векторы-строки  $\gamma_j = [\gamma_{j,1}, \gamma_{j,2}, \gamma_{j,3}, \gamma_{j,4}]$  нахождения СМО в микросостояниях  $j$ -го яруса. Теперь запишем векторно-матричные уравнения баланса переходов между состояниями, указанными на диаграмме:

$$\gamma_0 D_0 = \gamma_1 B_1 + \gamma_0 C_0,$$

$$\gamma_j D_j = \gamma_{j-1} A_{j-1} + \gamma_j C_j + \gamma_{j+1} B_{j+1}, \quad j = \overline{1, R},$$

где  $R$  – число обсчитываемых ярусов диаграммы.

Для решения данной системы уравнений воспользуемся итерационным методом [4, 5]. В результате расчета получим отношения смежных вероятностей числа заявок в системе  $x_j = p_{j+1}/p_j$ ,  $j = \overline{1, R}$ . Для нижнего ( $R$ -го) яруса упомянутое отношение считается  $x_R = p_{R-1}/p_R$ .

После окончания итераций, используя значения  $x_j$ , осуществим переход к вероятностям состояний системы по следующему алгоритму:

– вероятность свободного состояния  $p_0$  положить равной 1;

– рассчитать  $p_{j+1} = p_j x_j$ ,  $j = \overline{1, R-1}$ ;



– вычислить сумму  $S = \sum_{j=0}^R p_j$ ;

– нормировать полученные значения:  $p_j = p_j/S$ ,  $j = \overline{0, R}$ .

Расчет возможен и для систем без ограничения буфера. В этом случае предполагается, что «хвост» распределения числа заявок представляет собой бесконечно убывающую геометрическую прогрессию, знаменатель которой равен отношению двух последних рассчитанных вероятностей  $x_R$ .

Расчет временных характеристик основан на очевидном методе сверток [6]. Время ожидания вновь прибывшей заявки определяется микросостоянием системы сразу после ее прибытия. Введем для каждого яруса диаграммы вектор-строку  $\pi_j = [\pi_{j,1}, \pi_{j,2}, \pi_{j,3}, \pi_{j,4}]$ ,  $j = \overline{1, R}$  финального распределения вероятностей микросостояний системы сразу после прибытия очередной заявки. Поскольку входящий поток не пуассоновский, условия теоремы PASTA (Poisson Arrival See Time Average) [7] не выполняются и финальное распределение  $\pi_j$  не совпадает со стационарным  $\gamma_j$ .

Так как компоненты вектора  $\pi_j$  представляют собой относительные числа поступлений заявок, с прибытием которых система перешла в соответствующее микросостояние,

$$\pi_j = \gamma_{j-1} A_{j-1} \left/ \sum_{i=0}^R \gamma_i A_i \mathbf{1}_{i+1} \right.,$$

где  $\mathbf{1}_{i+1}$  – единичный вектор-столбец размером  $\sigma_{i+1} \times 1$ .

Далее назовем «меченой»  $j$ -заявкой ту заявку, сразу после прибытия которой длина очереди становится равной  $j$ . Если с приходом меченой  $j$ -заявки система перейдет в микросостояния режима обслуживания  $j$ -го яруса диаграммы, она будет ожидать  $j$  завершений обслуживания, каждое из которых происходит с интенсивностью  $n\mu$ . Распределение соответствующего времени ожидания является  $j$ -кратной сверткой распределений завершений обслуживания. В терминах преобразований Лапласа – Стильтьеса (ПЛС) свертка реализуется через произведение

$$\omega_{j,s}(s) = \left( \frac{n\mu}{n\mu + s} \right)^j.$$

Если с приходом меченой  $j$ -заявки система перейдет в микросостояния режима охлаждения  $j$ -го яруса, то к этому времени ожидания необходимо прибавить длительность охлаждения, экспоненциальное распределение которой имеет параметр  $\mu_c$ . ПЛС ожидания в этом случае можно представить в виде

$$\omega_{j,c}(s) = \frac{\mu_c}{\mu_c + s} \left( \frac{n\mu}{n\mu + s} \right)^j.$$

Введем вектор-столбец  $\omega_j(s) = [\omega_{j,s}(s), \omega_{j,c}(s), \omega_{j,c}(s), \omega_{j,s}(s)]^T$ . Расположение элементов вектора  $\omega_j(s)$  обусловлено структурой диаграммы, крайние ветви которой соответствуют режиму обслуживания, внутренние – режиму охлаждения.

Исходя из принятых обозначений, ПЛС искомого времени ожидания начала обслуживания

$$\omega(s) = \sum_{j=1}^R \pi_{j+n} \omega_j(s). \quad (1)$$

Для получения начальных моментов времени ожидания можно выполнить дифференцирование в нуле выражения (1) либо заменить все входящие в него ПЛС наборами начальных моментов, а их произведения – свертками в моментах [4].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для исследования влияния процесса охлаждения на функционирование СМО выполним расчет среднего времени ожидания начала обслуживания  $w_1$  через формулу (1) при следующих исходных данных:

- число каналов  $n = 3$ ;
- среднее значение интервала между заявками входящего потока  $a_1 = 0,4$ ; коэффициент вариации  $v = 2,0$ ;
- средняя интенсивность обслуживания заявок  $\mu = 1$ ;
- среднее время охлаждения системы  $c_1 \in [0; 5]$ .

Результаты расчетов приведены на графике (рис. 2).

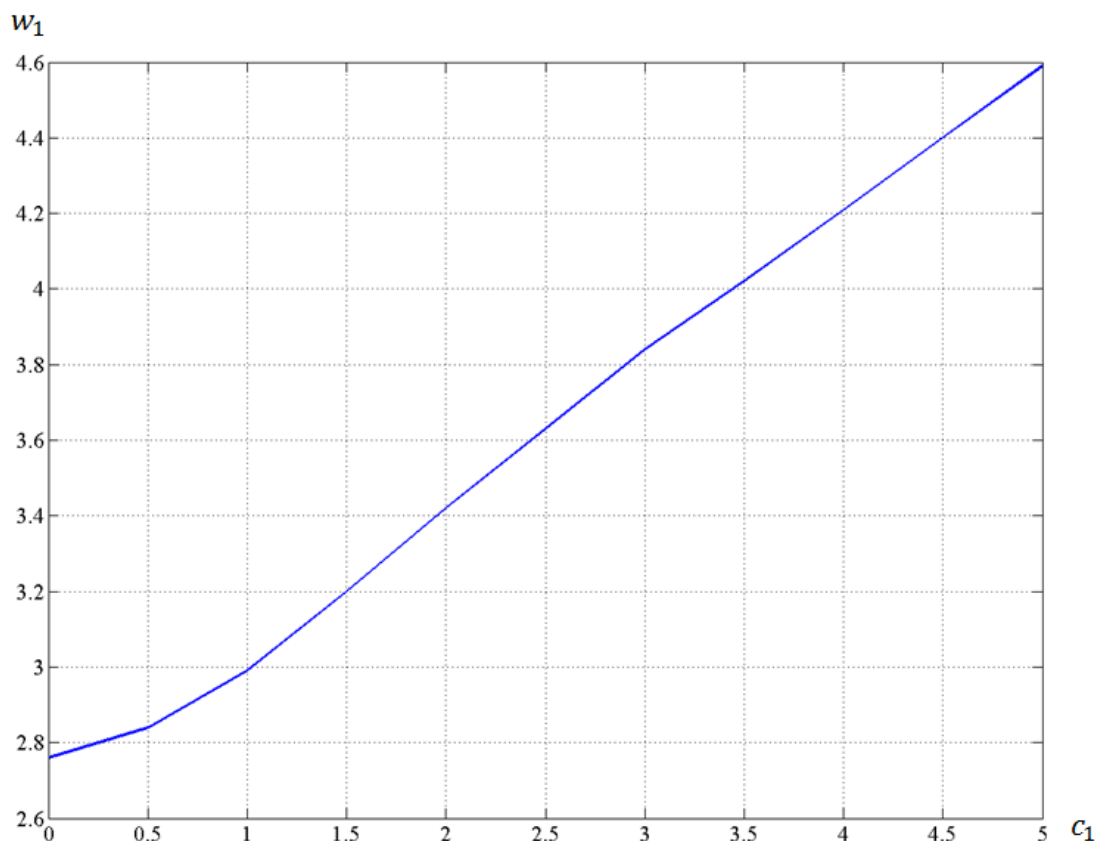


Рис. 2. Зависимость среднего времени ожидания от среднего времени охлаждения в системе с охлаждением  $H_2/M/n-M$

Из представленного графика можно сделать вывод о близости к линейной зависимости среднего времени ожидания заявок от среднего времени охлаждения системы при  $c_1 > 0,5$ .

Для исследования влияния вида распределения интервалов входящего потока заявок на характеристики СМО выполним ее расчет при тех же исходных данных для различных вариантов упомянутого распределения с использованием  $H_2$ -аппроксимации.

Параметры  $H_2$ -распределения подбирались по трем моментам рассмотренных вариантов исходных распределений интервалов между заявками входящего потока:

- вырожденного  $D$  (коэффициент вариации  $v = 0$ );
- равномерного  $U$  на интервале  $[0; 0,8]$  ( $v \approx 0,577$ );
- экспоненциального  $M$  ( $v = 1$ );
- гамма  $\Gamma$  с параметром формы  $0,5$  ( $v \approx 1,41$ );
- Вейбулла  $W$  с параметром формы  $0,46$  ( $v = 2,5$ ).

Результаты расчета распределения числа заявок в системе показаны на рис. 3.

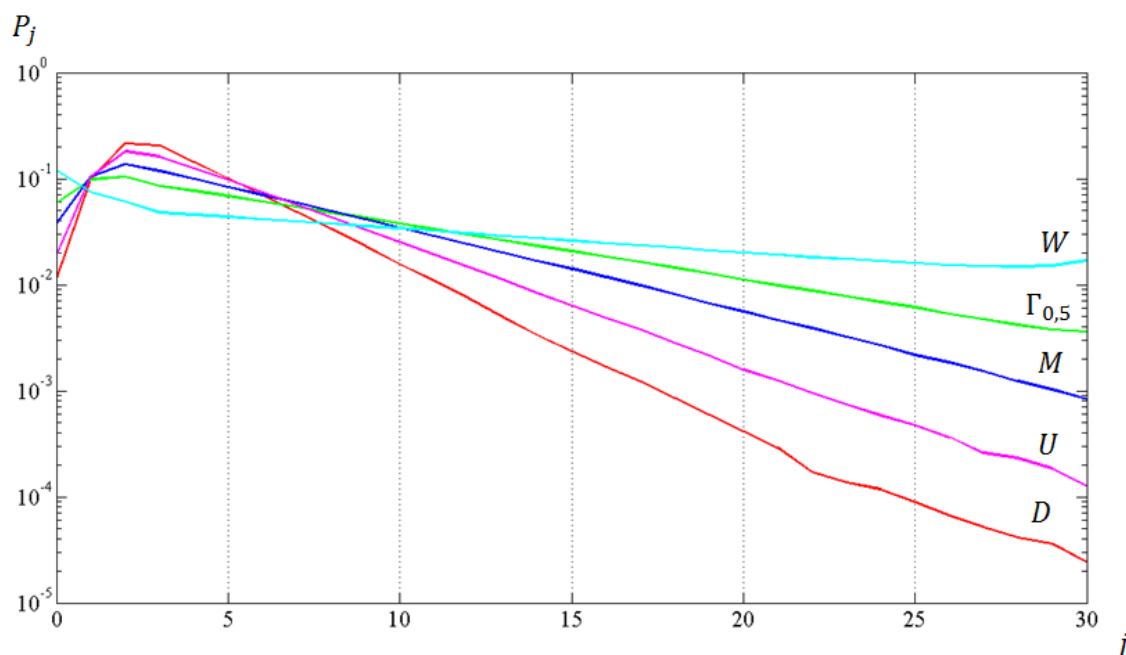


Рис. 3. Распределение числа заявок в системе с охлаждением  $H_2/M/n-M$

Из представленных графиков следует вывод о существенном влиянии коэффициента вариации интервалов между заявками входящего потока на распределение числа заявок в системе.

В табл. 1 приведены результаты расчета начальных моментов распределения времени ожидания  $\{w_i\}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ .

Таблица 1

**Начальные моменты времени ожидания**

$B(t)$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
$D$	6.1144e-01	1.3282e+00	4.3974e+00
$U$	9.0089e-01	2.5153e+00	1.0399e+01
$M$	1.4203e+00	5.2447e+00	2.7001e+01
$\Gamma_{0,5}$	2.0339e+00	9.2623e+00	5.5762e+01
$W$	3.2467e+00	1.8781e+01	1.3268e+02

По полученным начальным моментам времени ожидания может быть подобрана дополнительная функция распределения (ДФР), с помощью которой можно оценить вероятность превышения порогового значения длительности ожидания. Данная характеристика является важным показателем оперативности функционирования информационных систем, критичных к временным задержкам. В качестве ДФР удобно использовать распределение Вейбулла, параметры которого могут быть вычислены по двум начальным моментам времени ожидания [4].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные численные результаты свидетельствуют о существенном влиянии коэффициента вариации интервалов между заявками входящего потока на вероятностно-временные характеристики СМО с «охлаждением». Применение  $H_2$ -распределения позволяет

проводить анализ указанного класса СМО с произвольными распределениями интервалов между заявками входящего потока.

Коллектив авторов выражает искреннюю благодарность профессору кафедры математического и программного обеспечения Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского *Рыжикову Юрию Ивановичу* за проявленный к данной работе интерес и ценные рекомендации.

### Список используемых источников

1. *Хомоненко А.Д., Халил М.М., Гиндин С.И.* Моделирование облачных вычислений с использованием многоканальной системы массового обслуживания с «охлаждением» // Материалы XIX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2016). 25-27 мая 2016 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – Т.1. – С.247–251.
2. *Халил М.М., Андрук А.А.* Тестирование программного комплекса расчета многоканальных систем массового обслуживания с «охлаждением» и  $E_2$ -аппроксимацией // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2016. – № 4(8). – С. 22–28.
3. *Лохвицкий В.А., Уланов А.В.* Численный анализ системы массового обслуживания с гиперэкспоненциальным «охлаждением» // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 4(37). – С. 36–43.
4. *Рыжиков Ю.И.* Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 496 с.
5. Итерационный метод расчета системы с коксовским обслуживанием  $M/C_2/n$  и его программная реализация / А.В. Уланов, В.А. Лохвицкий, Д.Ю. Старобинец, А.Ф. Шинкаренко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 5. – С. 277–289.
6. *Хомоненко А.Д.* Распределение времени ожидания в системах массового обслуживания типа  $GI_q/H_k/n/R \leq \infty$  // Автоматика и телемеханика. – 1990. – № 8. – С. 91–98.
7. *Serfozo R.* Basics of Applied Stochastic Processes. – Berlin: Springer, 2009. – 443 p.
8. *Щербаков Е.С., Корчагин П.В.* Применение методов теории возможностей при моделировании систем защиты информации // Вопросы кибербезопасности. – 2017. – № 1. – С. 21–49.

А.В. Алферов  
в/ч 96434, Ленинградская область;  
Д.Н. Комраков;  
М.А. Сквазников,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТАВА ГРУППИРОВКИ ОРБИТАЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ЗАДАЧЕ СЪЕМКИ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА**

В статье рассматриваются возможности и условия совместного применения космических и беспилотных летательных аппаратов для решения прикладных задач по съемке площадных объектов. Представлены модели площадного объекта и оптико-электронных средств дистанционного зондирования Земли. Предлагается алгоритм оценивания состава группировки аэрокосмических средств дистанционного зондирования Земли при совместном использовании.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, беспилотный летательный аппарат.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время возрастание спроса на данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обусловлено их использованием для решения большого числа прикладных задач в различных областях: картографировании, прогнозировании глобальных природных процессов, управлении транспортными потоками, поиске полезных ископаемых, государственном и муниципальном управлении, научных исследованиях и т.п. В основном данные ДЗЗ добываются в результате использования космических аппаратов (КА) или летательных аппаратов. Развитие отрасли ДЗЗ сопровождается значительным улучшением параметров съемки и расширением перечня решаемых прикладных задач.

Анализ условий и особенностей применения средств ДЗЗ [1] показал, что недостатки одного вида средств ДЗЗ могут компенсироваться достоинствами средств другого вида, и позволил выявить предпосылки к исследованию возможности их совместного применения. Например, КА ДЗЗ на типовой солнечно-синхронной орбите обеспечивают высокопроизводительную съемку объектов, расположенных в любой точке поверхности суши Земли. В свою очередь, комплексы с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) обеспечивают получение актуальной детальной информации об объектах в районе наблюдения, а также могут использоваться для уточнения данных, полученных в результате применения КА.

Для решения отдельных задач ДЗЗ, таких как контроль состояния сельскохозяйственных посевов и лесных угодий; вскрытие незаконной вырубки леса; обнаружение очагов возгорания и мониторинг лесных пожаров; поиск потерпевшей катастрофу авиационной техники; обновление топографических карт; построение цифровых моделей рельефа местности и т.д., требуется выполнение площадной съемки.

Целевое применение средств ДЗЗ предполагает проведение ряда мероприятий, основанных на планировании. В общем случае под планированием понимается распределение имеющихся ресурсов для достижения поставленной цели. При планировании совместного применения средств ДЗЗ для съемки площадного объекта (ПО) необходимо определить число орбитальных и число воздушных средств для покрытия района наблюдения снимками с требуемым качеством.

Отечественный оператор космических систем ДЗЗ применяет отработанные и проверенные многолетней практикой подходы к планированию и применению орбитальных средств ДЗЗ. В зависимости от решаемых задач, планирование подразделяется на предварительное (на один год), долгосрочное (30 сут.), оперативное (3–10 сут.) и текущее (0,5–2 сут.) [2, 3].

Планирование применения БЛА, в отличие от КА, характеризуется рядом особенностей, связанных с разработкой полетного задания и учетом условий съемки в районе наблюдения. Разработка полетного задания и закладка его на БЛА производятся непосредственно перед выполнением съемочных работ с возможностью коррекции траектории полета в пределах зоны радиовидимости с наземного пункта управления.

Процессы планирования применения БЛА и КА ДЗЗ в настоящее время осуществляются по известным методикам [2, 4]. Они реализуются независимо друг от друга и характеризуются наличием несвязанных информационно-управляющих контуров. Это приводит к возникновению избыточности информации и снижению эффективности общего процесса добывания данных ДЗЗ о конкретном ПО. Вследствие того, что каждый из исследуемых видов средств ДЗЗ используется независимо, возникает проблема планирования их совместного применения.

Планирование совместного использования средств ДЗЗ позволит повысить результативность съемки ПО при ограничениях по времени актуализации и выделенному ресурсу КА и БЛА. Таким образом, тема исследования, суть которого состоит в разработке алгоритма оценивания состава группировки КА и БЛА ДЗЗ при планировании съемки ПО, является актуальной.

## МОДЕЛИ ПЛОЩАДНОГО ОБЪЕКТА И СРЕДСТВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМКИ

Стандартное описание района наблюдения для средств ДЗЗ состоит в представлении его границы в виде последовательности пар координат узловых точек. В рамках исследования предлагается упрощенное описание ПО в виде окружности с заданным центром и радиусом (рис. 1).

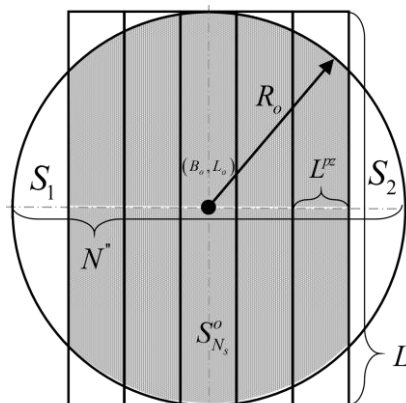


Рис. 1. Параметры ПО

Модель ПО описывается вектором параметров:

$$O_{( )} = \langle (B_o; L_o); R_o; t_b; t_e \rangle, \quad (1)$$

где  $B_o$  – геодезическая широта центра площадного объекта;

$L_o$  – геодезическая долгота центра площадного объекта;

$R_o$  – радиус площадного объекта;

$t_b$  – время начала периода актуализации информации о площадном объекте;

$t_e$  – время окончания периода актуализации информации о площадном объекте.

Группировка КА представлена аппаратами, движущимися по солнечно-синхронным около-круговым орбитам с одинаковыми параметрами. Прогноз орбитального движения реализован программными средствами пакета MathCAD. Исходными данными для расчета являются кеплеровы элементы орбиты КА, а именно: долгота восходящего узла, наклонение орбиты, аргумент перигея, большая полуось орбиты, эксцентриситет орбиты, время прохождения перигея [5].

Под расчетом прогноза движения понимается определение вектора положения КА  $\vec{r}_i = \langle X_i, Y_i, Z_i \rangle$  и вектора скорости  $\vec{V} = \langle V_{xi}, V_{yi}, V_{zi} \rangle$  для совокупности моментов времени  $\langle t_i \rangle_t, i = 1(1)I$  в геоцентрической гринвичской системе координат.

Модель группировки КА описывается вектором параметров:

$$S_{\langle \rangle} = \langle N_s; L^{pz}; \gamma^{\max}; H; R_{[\vec{r}_i, T_i]}; T_{is}^{\max} \rangle, \quad (2)$$

где  $N_s$  – число КА;

$L^{pz}$  – полоса захвата оптико-электронной системы (ОЭС) КА;

$\gamma^{\max}$  – максимальный угол разворота оптической оси ОЭС КА от надира;

$H$  – высота орбиты КА;

$R_{[\vec{r}_i, T_i]}$  – массив данных о положении КА (прогноз орбитального движения КА);

$T_{is}^{\max}$  – продолжительность одного цикла съемки КА.

Съемка объектов на поверхности Земли в видимом диапазоне спектра выполняется при достаточном уровне освещенности. Определяющим фактором, влияющим на уровень освещенности в подспутниковых точках, является положение Солнца, для описания которого относительно объекта на поверхности Земли в момент времени  $T_{\text{МСК}}$  используется высота (угол места) над плоскостью местного горизонта  $h_{\odot}$ . Угол места Солнца определяется для объекта на земной поверхности с географическими широтой  $\varphi$  и долготой  $\lambda$  по формуле [6]

$$h_{\odot}(T_{\text{МСК}}) = \arcsin(\sin \delta_{\odot} \sin \varphi_o + \cos \delta_{\odot} \cos \varphi_o \cos \Delta \lambda_{\odot}(T_{\text{МСК}})), \quad (3)$$

где  $\delta_{\odot}$  – склонение Солнца;

$\Delta \lambda_{\odot}$  – разность долгот меридианов Солнца  $\lambda_{\odot}$  и некоторой точки  $\lambda_o$  (часовой угол),  $\Delta \lambda_{\odot} = 225^{\circ} - 15^{\circ}(T_{\text{МСК}} - \eta_{\odot}) - \lambda_o$ ;

$T_{\text{МСК}}$  – московское время (в часах и долях часа);

$\eta_{\odot}$  – результат вычисления уравнения времени (в долях часа).

Условие попадания объекта наблюдения в зону обзора КА формулируется из следующих рассуждений. Объект наблюдения находится в зоне видимости КА, если угол между векторами положения КА и объекта наблюдения  $\alpha$  меньше угла полураствора  $\alpha_{\text{pred}}$ , вершина которого располагается в центре Земли (рис. 2).

Угол полураствора  $\alpha_{\text{pred}}$  определяется по формуле

$$\alpha_{\text{pred}} = \arcsin \left[ \frac{H + R_3}{R_3} \cdot \frac{\text{tg}(\gamma^{\text{max}})}{\sqrt{1 + \text{tg}^2(\gamma^{\text{max}})}} \right] - \arccos \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2(\gamma^{\text{max}})}} \right], \quad (4)$$

где  $R_3$  – радиус Земли.

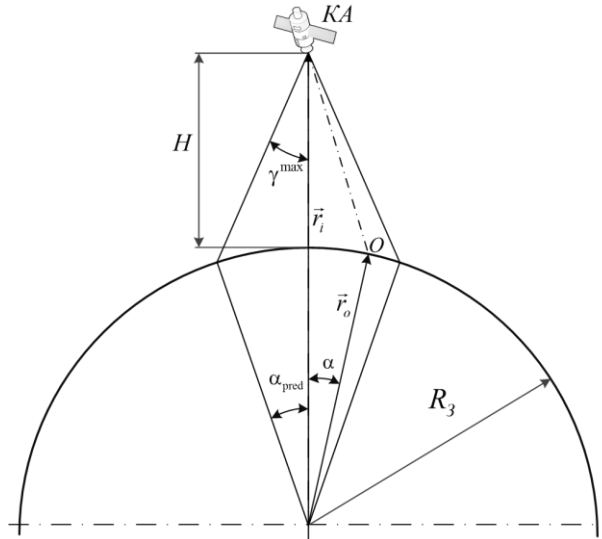


Рис. 2. Условие попадания объекта наблюдения в зону обзора КА

Угол между векторами положения КА и объекта наблюдения  $\alpha$  определяется по формуле

$$\alpha = \arccos \frac{(\vec{r}_i \cdot \vec{r}_o)}{|\vec{r}_i| \cdot |\vec{r}_o|} = \arccos \frac{x_i \cdot x_o + y_i \cdot y_o + z_i \cdot z_o}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \cdot \sqrt{x_o^2 + y_o^2 + z_o^2}}, \quad (5)$$

где  $\vec{r}_i$  – радиус-вектор положения КА,  $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ ;

$\vec{r}_o$  – радиус-вектор положения объекта,  $\vec{r}_o = (x_o, y_o, z_o)$ .

Условие попадания объекта наблюдения в зону обзора ОЭС КА описывается следующим неравенством:

$$\alpha < \alpha_{\text{pred}}. \quad (6)$$

Таким образом, на основе формул (3)–(5) определяется число  $N'$  возможных попаданий объекта в зону обзора КА, удовлетворяющих условию съемки по углу Солнца.

В качестве допущения принимается, что протяженность маршрута съемки КА ДЗЗ не меньше значения суммы двух радиусов ПО. В силу того что по сравнению с БЛА современные КА ДЗЗ характеризуются большей производительностью, целесообразно использовать ресурсы КА для съемки наиболее протяженных участков в окрестности центра ПО. Исходя из указанных условий ПО разбивается на участки, равные по ширине полосе захвата КА, как представлено на рис. 1. Для покрытия участков ПО, не попавших в полосу захвата КА за период актуализации, необходимо использовать БЛА.

В соответствии с рис. 1 для актуализации данных о ПО на основе снимков от КА требуется найти число циклов съемки  $N''$ , определяемое выражением

$$N'' = \frac{2R_o}{L_{N_s}^{Pz}}. \quad (7)$$

Модель БЛА описывается вектором параметров

$$D_{\langle \rangle} = \langle \beta_g; \beta_v; H_D; V_D; T_D^{\text{max}}; T_D^{\text{is}} \rangle, \quad (8)$$

где  $\beta_g$  – угол поля зрения ОЭС вдоль трассы полета БЛА;



- $\beta_v$  – угол поля зрения ОЭС поперек трассы полета БЛА;  
 $H_D$  – высота полета БЛА;  
 $V_D$  – крейсерская скорость полета БЛА;  
 $T_D^{\max}$  – максимальная длительность полета БЛА;  
 $T_D^{is}$  – время предполетной/межполетной подготовки БЛА.

Размеры области захвата ОЭС БЛА зависят от высоты полета, углов поля зрения ОЭС [4]. Проекция поля зрения ОЭС БЛА на поверхности Земли при плановой кадровой съемке схематично представлена на рис. 3.

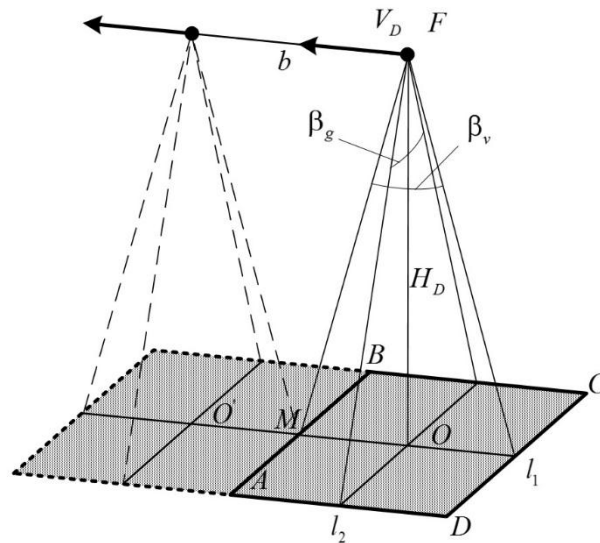


Рис. 3. Проекция области захвата ОЭС БЛА при плановой съемке

Как видно из рис. 3, интересующая проекция описывается прямоугольником  $ABCD$ . Местоположение БЛА определяется в точке  $F$  с размещенной на его борту ОЭС, а прямая  $FO$  описывает положение линии визирования.

Параметры проекции области захвата ОЭС БЛА оцениваются по следующим формулам:

$$l_1 = CD = AB = 2H_D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_g}{2}\right); \quad l_2 = AD = CB = 2H_D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_v}{2}\right). \quad (9)$$

Площадь участка ПО, соответствующего области захвата ОЭС БЛА при заданных значениях параметров  $H_D, \beta_g$  и  $\beta_v$ , определяется формулой

$$S_{obz} = 4H_D^2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_g}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_v}{2}\right). \quad (10)$$

При допущении, что базис съемки  $b=l_2$ , значение интервала съемки  $t_k$  вычисляется следующим образом:

$$t_k = \frac{2H_D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_v}{2}\right)}{V_D}. \quad (11)$$

При известной максимальной продолжительности полета БЛА  $T_D^{\max}$  число кадров определяется отношением

$$N_{chk} = \frac{T_D^{\max}}{t_k}. \quad (12)$$

С учетом выражений (10) и (12) площадь участка ПО  $S_D$ , по территории которого БЛА обеспечивает съемку за  $T_D^{\max}$ , вычисляется по формуле

$$S_D = N_{chk} \cdot S_{obz}. \quad (13)$$

Требуемое число вылетов БЛА  $N_D^1$  для покрытия заданной площади ПО  $S_D$  рассчитывается по формуле

$$N_D^1 = \left\| \frac{S_D^O}{S_D} \right\|, \quad (14)$$

где  $\| \cdot \|$  – операция округления числа в сторону большего целого значения.

Предполагается, что съемка с БЛА выполняется в видимом диапазоне спектра. При этом основным требованием является наличие достаточной освещенности объектов на поверхности Земли. В силу этого необходим расчет количества дневного времени  $T_{osv}$  из общего времени актуализации информации  $T_{da}$ , при котором угол места Солнца над местным горизонтом объекта не меньше требуемого значения, например  $h_{\odot} > 10^\circ$ .

Суммарное время  $T_D$  применения отдельного БЛА определяется по формуле

$$T_D = T_D^{is} + T_D^{\max}. \quad (15)$$

Требуемое число БЛА для покрытия заданной площади  $S_D^O$  за время  $T_{osv}$  определяется по формуле

$$N_D = \left\| \frac{N_D^1 \cdot T_D}{T_{osv}} \right\|. \quad (16)$$

## АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТАВА ГРУППИРОВКИ СРЕДСТВ ДЗЗ

Предлагаемый алгоритм предназначен для учета ограничений по условиям съемки при решении задачи формирования состава группировки орбитальных и воздушных средств ДЗЗ на этапе текущего планирования и разработки плана совместного применения КА и БЛА по заявкам заинтересованных потребителей.

Схема алгоритма представлена на рис. 4. Работа алгоритма начинается с ввода параметров ПО, условий наблюдения и параметров КА ДЗЗ. Далее выполняется цикл с числом повторений по числу КА  $N$ . Для текущего значения  $N$  формируется прогноз орбитального движения в течение периода актуализации  $T_{da} \in [t_b; t_e]$ . В каждый расчетный момент времени определяются условия съемки по углу Солнца над плоскостью местного горизонта  $h_{\odot}$ . По формулам (4) и (5) вычисляются углы  $\alpha_{pred}$  и  $\alpha$ . На выходе цикла формируется число возможных маршрутов  $N'_s$ , удовлетворяющих условию (6). После расчета числа циклов съемки  $N''$ , требуемых для покрытия всего ПО, с использованием формулы (7) сравнивается число возможных маршрутов  $N'_s$  с требуемым числом циклов съемки  $N''$ . Если  $N'_s > N''$ , то для актуализации информации о ПО достаточно использовать только орбитальные средства – КА ДЗЗ, в противном случае рассчитывается требуемое число БЛА для съемки остав-

шейся части ПО  $S_D^O$ . Для расчета требуемого числа БЛА определяется площадь участка ПО  $S_D^O$  для съемки с использованием БЛА:

$$S_D^O = S_1 + S_2, \quad (17)$$

где  $S_1, S_2$  – площади сегментов (рис. 1).

Расчет требуемого числа БЛА начинается в алгоритме с ввода параметров БЛА. Далее в блоках 15–22 производятся расчеты по формулам (9)–(16). По результатам расчетов определяются параметры состава группировки средств ДЗЗ для съемки ПО.

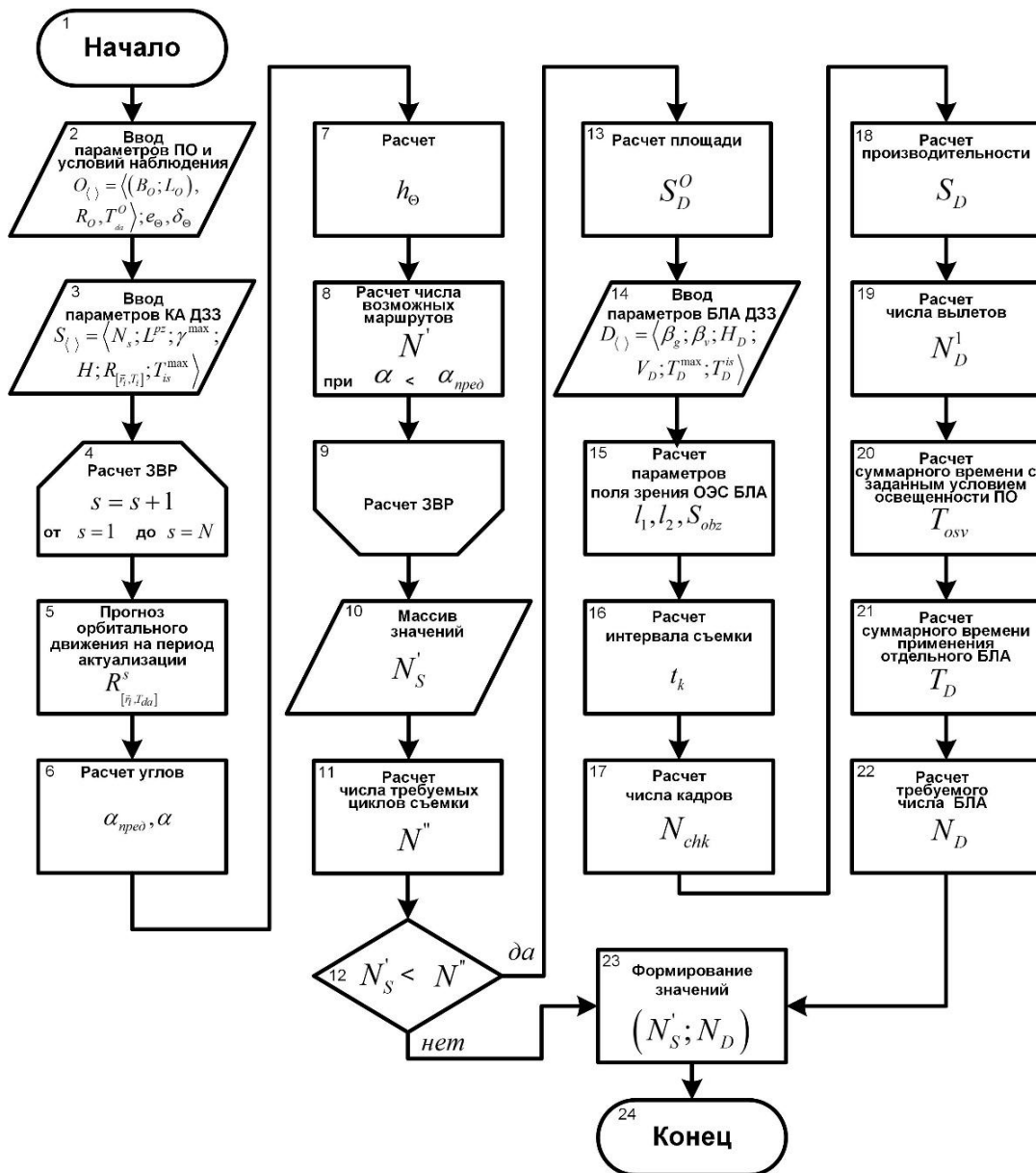


Рис. 4. Схема алгоритма оценивания состава группировки средств ДЗЗ

## ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНИВАНИЮ СОСТАВА ГРУППИРОВКИ СРЕДСТВ ДЗЗ

В ходе исследований с использованием разработанного алгоритма был проведен эксперимент по оцениванию состава группировки средств ДЗЗ с заданными параметрами на примере

актуализации информации о ПО. Для выполнения расчетов использовались параметры условно-реальных средств ДЗЗ и параметры площадного объекта (табл. 1)

В качестве начальных условий для расчета прогноза движения КА выбраны массивы данных о векторах положения на период актуализации.

Время начала периода актуализации = 16.10.2017; 19:04:25.

Результат моделирования движения КА на период актуализации и условие попадания ПО в полосу обзора представлены на рис. 5.

В табл. 2 приведены результаты расчета требуемых и возможных циклов съемки заданных ПО. Как видно из табл. 2, при уменьшении числа КА до пяти аппаратов и при сокращении периода актуализации до 5 сут. съемка ПО не полностью обеспечивается орбитальными средствами и необходимо использовать БЛА. Результаты расчета требуемого числа БЛА представлены в табл. 3.

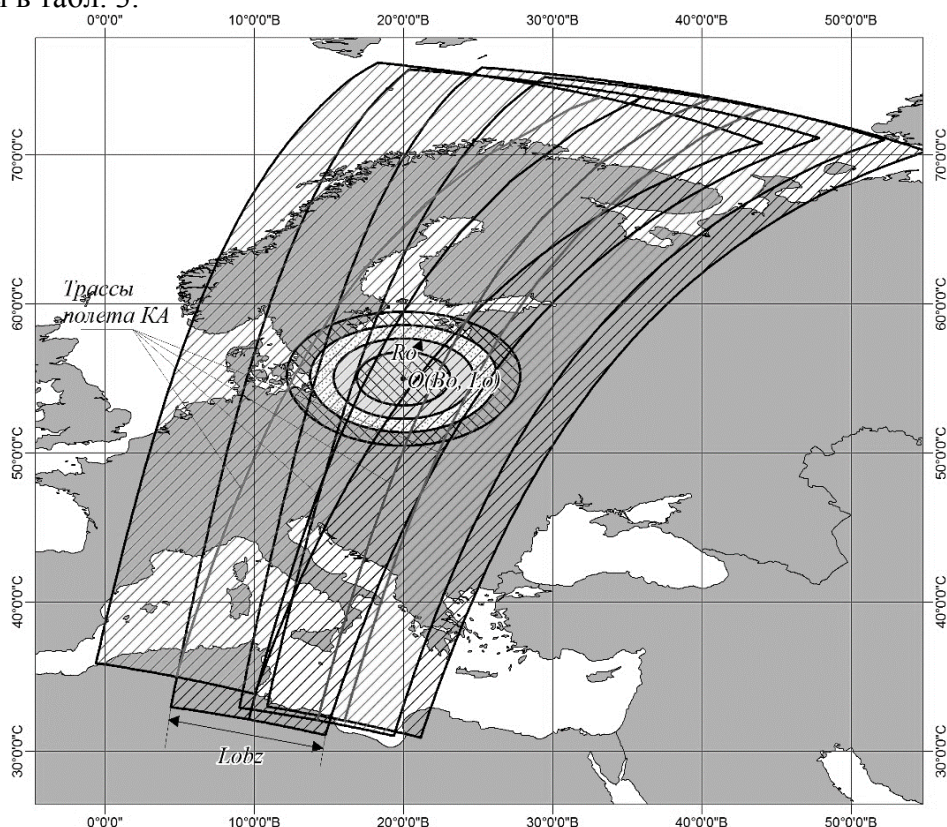


Рис. 5. Пример результатов моделирования трасс полета КА и ПО в полосу обзора

Таблица 1

**Исходные данные для расчета параметров группировки**

Параметры ПО $O_{\langle \rangle}$				
Координаты центра объекта $(B_o; L_o)$ , град	$(55.65^\circ \text{ с. ш.}; 20.90^\circ \text{ в. д.})$			
Радиус $R_o$ , км	200	300	400	500
Параметры КА $S_{\langle \rangle}$				
Число КА $N_s$	2/5/7/10			
Ширина полосы захвата $L^{pz}$ , км	30			

Окончание табл. 1

Параметры ПО $O_{\langle \rangle}$	
Высота орбиты $H$ , км	510±10
Максимальный угол разворота оптической оси ОЭС КА $\gamma^{\max}$ , град	±40
Максимальная протяженность маршрута $L'(T_{st}^{\max})$ , км	2100
Параметры БЛА $D_{\langle \rangle}$	
Высота полета $H_D$ , км	4
Скорость полета $V_D$ , км/ч	200
Продолжительность полета $T_D^{\max}$ , ч	5
Время предполетной/межполетной подготовки БЛА $T_D^{is}$ , мин	30
Угол поля зрения ОЭС вдоль трассы полета БЛА $\beta_g$ , град	40
Угол поля зрения ОЭС поперек трассы полета БЛА $\beta_v$ , град	27

Таблица 2

## Результаты расчета параметров орбитальных средств ДЗЗ

$T_{ad}$ , сут.	9	7	5	2	$N''$	$R_o$ , км
$N_s$	$N'_s$					
10	90	70	50	20	13	200
7	63	49	35	14	20	300
5	45	35	25	10	26	400
2	18	25	10	4	33	500

Таблица 3

## Результаты расчета требуемого числа БЛА

$T_{osv}$ , ч	108	84	60	24
$R_o$ , км	$N_D$			
200	-	-	-	-
300	-	-	-	2
400	-	-	1	13
500	3	5	9	34

Выделенные ячейки в табл. 2 и табл. 3 содержат число возможных маршрутов  $N'_s$ , не удовлетворяющих условию блока 12 предложенного алгоритма, и значения требуемого числа БЛА для съемки оставшейся части ПО  $S_D^o$  соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложены модели площадного объекта и оптико-электронных средств ДЗЗ. Разработан алгоритм оценивания состава группировки орбитальных и воздушных средств ДЗЗ, который позволяет оценить возможности совместного использования группировки БЛА и КА ДЗЗ при решении задачи актуализации информации о ПО в зависимости от состава группировки, параметров объекта, условий съемки и продолжительности времени актуализации информации. Представлены результаты эксперимента по оцениванию состава группировки оптико-электронных орбитальных и воздушных средств ДЗЗ, полученные на основе параметров условно-реальных средств ДЗЗ, для актуализации информации о ПО. Предполагается усовершенствование предложенного алгоритма за счет расширения принятых допущений, например, учета метеорологических условий в районе наблюдения и ограничений по качеству данных.

## Список используемых источников

1. Волков А.Е., Суетина Н.В. Применение современных комплексов оптико-электронного наблюдения с высоким разрешением в системах аэрокосмического мониторинга Земли // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2012. – № 9 – С.170–173.
2. Урличич Ю.М., Селин В.А., Емельянов К.С. О приоритетах практической реализации развития космической системы дистанционного зондирования Земли // Аэрокосмический курьер. – 2011. – № 6 (78). – С.12–19.
3. Григорьев А.Н. Методика текущего планирования и применения космических средств при управлении системой дистанционного зондирования Земли // Вестник Российского нового университета. – 2015. – № 9. – С.69–73.
4. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. – 768 с. – (Современная прикладная математика и информатика).
5. Гнусарев Н.В. Геодезическое и баллистическое обеспечение космических систем дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. – 220 с.
6. К вопросу учета условий освещенности при съемке космических объектов фотографическими средствами / О.И. Атакищев, А.И. Алтухов, Н.В. Гнусарев и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 3 (42). – С.58–62.

И.В. Бережной,  
*кандидат техн. наук;*  
И.Ю. Еремеев,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
В.Н. Маковский,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ОРГАНИЗОВАННОСТИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Поиск новых подходов к решению задач дистанционного мониторинга военно-технических систем инициирован выявлением фактов неустойчивости и противоречивости оценок их состояний на основе классической теории информации. Для решения прикладных задач радиоконтроля подвижных (динамических) объектов требуется формирование теоретической основы для разработки научно-методического аппарата распознавания состояний сложных динамических систем в условиях априорной неопределенности относительно параметров их функционирования.

Ключевые слова: организованность, динамические системы, системы связи и передачи данных с динамической топологией сети.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Традиционно для решения задач мониторинга военно-технических систем (ВТС) в условиях неопределенности исходных данных применялись вероятностно-статистические методы [1, 2]. Однако, как показала практика, использование только таких методов для решения практических задач ограничивается следующими обстоятельствами:

- необходимостью учета факторов неопределенности, имеющих нестатистическую природу (субъективные оценки, игровая неопределенность и т.д.);
- невозможностью получения вероятностно-статистических данных о складывающихся ситуациях в сложных динамических системах;
- ограниченностью информации, приводящей к неустойчивости получаемых статистических распределений;
- необходимостью учета большого объема разнородной и противоречивой информации, приводящей к математическим трудностям при формализации и решении рассматриваемых задач.

Одним из классов задач мониторинга ВТС, к числу которых относятся системы связи и передачи данных с динамической топологией сети (ССДТС), являются задачи оценивания состояния их организационной структуры по совокупности наблюдений технических параметров функционирования отдельных элементов.

Под динамическим объектом далее будем понимать элемент наблюдаемой ВТС, параметры функционирования которого могут изменяться во времени в зависимости от реализуемой ВТС целевой функции.

Совокупность наблюдаемых динамических объектов будем рассматривать как некоторую сложную динамическую систему.

Применительно к ССДТС в качестве динамического объекта можно рассматривать мобильную точку радиодоступа (ТРД), характеризуемую пространственным положением, параметрами движения, а также радиотехническими параметрами функционирования, такими как, например, выделенный частотный диапазон, интенсивность трафика и др. В качестве динамической системы в этом случае выступает сама ССДТС.

Множество состояний организационной структуры сложных динамических систем и закономерности ее изменений являются основой как для их классификации по показателю степени структурной организованности, так и для синтеза алгоритмов распознавания наблюдаемых сложных динамических систем по данному показателю.

Состояние наблюдаемой динамической системы, в том числе в аспекте ее организационной структуры, может быть оценено только по совокупности параметров наблюдаемых динамических объектов. Указанное обстоятельство определяет необходимость разработки научно-методического аппарата оценивания состояния организационной структуры сложных динамических систем по совокупности наблюдений параметров функционирования ее отдельных элементов. Собственно, решению данной задачи посвящена статья.

## ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ПОСТАНОВКА НАУЧНОЙ ЗАДАЧИ

Проведем формализацию частных задач в рамках общей задачи синтеза научно-методического аппарата оценивания состояния организационной структуры сложных динамических систем (СДС):

1) задача классификации СДС. Она состоит в том, что на основе рассмотрения множества возможных СДС необходимо обосновать показатель для оценивания состояния организационной структуры сложных динамических систем, обосновать классификационные признаки.

Пусть  $A$  – СДС, содержащая  $M_A$  элементов (динамических объектов), каждый из которых наблюдается по  $q$  параметрам в некоторый момент времени  $t_i$ . Далее обозначим  $P_{<q>}^{(j)} = \langle p_1^{(j)}, p_2^{(j)}, \dots, p_q^{(j)} \rangle$  – результаты оценивания параметров  $j$ -го динамического объекта.

Требуется найти функциональное преобразование  $F^{(1)}(\{P_{<q>}^{(j)}\})$ , обеспечивающее свертку совокупности результатов наблюдения в обобщенный показатель организованности и разделение множества возможных состояний СДС на классы  $\{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \dots\}$ ;

2) задача распознавания текущего состояния организационной структуры СДС и формирования траектории эволюции показателя ее структурной организованности на интервале наблюдения.

Пусть есть совокупность наблюдений  $q$  параметров элементов СДС  $\{P_{<q>}^{(j,i)}\}$ , где  $j$  – номер объекта,  $i$  – номер наблюдения (номер временного интервала),  $P_{<q>}^{(j,i)} = \langle p_1^{(j,i)}, p_2^{(j,i)}, \dots, p_q^{(j,i)} \rangle$  – оценки параметров  $j$ -го объекта в  $i$ -й момент времени,  $i=1(1)I$ ,  $j=1(1)M_A$ .

Требуется синтезировать решающее правило  $F^{(2)}(\{P_{<q>}^{(j,i)}\})$ , обеспечивающее отнесение наблюдаемой СДС по совокупности наблюдений к одному из предопределенных классов  $\{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \dots\}$  для каждого интервала времени  $t_i$ ,  $i=1(1)I$  и формирование таким образом траектории показателя организованности как последовательности смены состояний (классов).

Рассмотрим пример, где в качестве информативного признака взяты направления движения элементов системы. На рис. 1 представлены три структурно-подобные системы  $A_1, A_2, A_3$  (структурно-подобными мы называем системы, в составе которых выделяется одинаковое количество частей и наблюдается одно и то же пропорциональное соотношение последних по числу элементов).

По признаку «направление движения» все элементы систем  $A_1, A_2, A_3$  можно разделить на четыре части. Основные параметры систем приведены в табл. 1.

Для оценки организованности (упорядоченности) систем обычно используют теорию информации, которая базируется на информационно-энтропийной мере Шеннона [3]. Однако, как видно из таблицы, энтропия Шеннона для систем, представленных на рис.1, имеет оди-



наковое значение, т.е. не отличает эти системы друг от друга. В этих условиях основополагающая информационно-энтропийная мера Шеннона, взятая сама по себе, является инвариантной функцией относительно размеров структурно-подобных систем и не позволяет классифицировать состояния систем  $A_1, A_2, A_3$ .

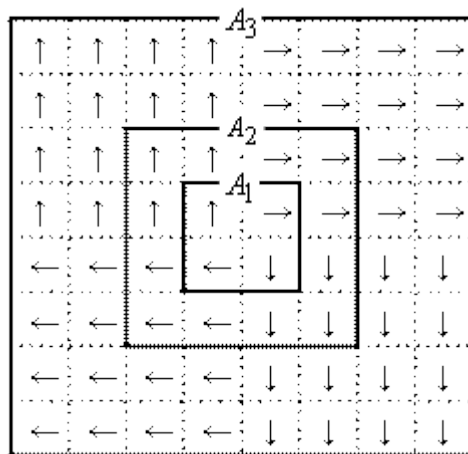


Рис.1. Структурно-подобные системы  $A_1, A_2, A_3$

Таблица 1

Общие параметры систем  $A_1, A_2, A_3$

Системы	Число элементов	Количество элементов в каждой части	Энтропия Шеннона
$A_1$	4	1	2
$A_2$	16	4	2
$A_3$	64	16	2

Для решения данной задачи осуществим поиск закономерностей, на основе которых можно осуществить выбор признаков классификации и решающего правила разделения образов.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

В традиционной теории информации, основанной на работах К. Шеннона [3] и Р. Хартли [4], информация рассматривается как нечто атрибутивно связанное с управлением (представляет собой снятую неопределенность выбора одной из множества возможностей). В статье под термином «информация» будем понимать сведения о конечном множестве как едином целом. Предметом изучения являются информационно-количественные аспекты отражения конечных множеств (дискретных систем) как целостных образований.

При описании дискретных систем через совокупность их частей происходит разделение отражаемой информации ( $I_A$ ) на отраженную и неотраженную части, равные, соответственно, аддитивной неэнтропии ( $I_\Sigma$ ) и энтропии ( $S$ ). Эти разновидности информации описываются следующими выражениями [5]:

$$I_A = \log_2(M_A + 1), \quad (1)$$

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M} \log_2 \left( m_i + \frac{1}{N} \right), \quad (2)$$

$$S = - \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M} \log_2 \frac{m_i}{M}, \quad (3)$$

где  $M_A$  – общее число элементов в составе системы;  
 $N$  – число частей системы;  
 $m_i$  – количество элементов в  $i$ -й части.

Аддитивная негэнтропия (2) и энтропия отражения (3) соотносятся между собой следующим образом: чем более хаотичной является структура системы, т.е. чем больше частей выделяется в ее составе и чем меньше эти части отличаются друг от друга по числу элементов, тем больше энтропия отражения и меньше аддитивная негэнтропия.

Упорядоченность и хаотичность в своей совокупности определяют в целом состояние организованности системы, и, соответственно, для ее количественной характеристики может использоваться функция, аргументами которой являются меры хаоса и порядка:  $R = f(I_A, S, I_{\Sigma})$ .

Как показано в работе [6], для этих целей может быть использован показатель организованности  $R$  дискретной системы, который позволяет получить количественную оценку организованности системы в отношении состава, структуры и свойств как на уровне всей системы в целом, так и на уровне подсистем и элементов:  $R = f(M_A, N, m_i)$ .

С учетом предлагаемой метрики [6] показатель организованности можно представить в виде выражения

$$R = \frac{I_{\Sigma}}{I_{\Sigma} + S} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_A} \log_2 \left( m_i + \frac{1}{N} \right)}{\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_A} \log_2 \left( m_i + \frac{1}{N} \right) - \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_A} \log_2 \left( \frac{m_i}{M_A} \right)} \quad (4)$$

или с учетом выражений (2) и (3) в следующем виде:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_A} \log_2 \left( m_i + \frac{1}{N} \right)}{\log_2 (M_A + 1)}. \quad (5)$$

В большинстве случаев (например, при оценке организованности распределения частотного ресурса между ТРД) удобней использовать величину, обратную  $R$ , – энтропийный показатель организованности  $R_S$ . Тогда

$$R_S = \frac{S}{I_{\Sigma} + S} = \frac{- \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{M_A} \log_2 \left( \frac{m_i}{M_A} \right)}{\log_2 (M_A + 1)}. \quad (6)$$

Показатели  $R$  и  $R_S$  по отношению друг к другу выступают в качестве взаимодополняющих противоположностей ( $R + R_S = 1$ ) и характеризуют информационное отражение дискретных систем с различных сторон – определенности и неопределенности соответственно. Их пересечение позволяет выделить область равновесного состояния системы.

Определим максимальные и минимальные значения энтропийного показателя организованности  $R_S$  при фиксированном количестве частей системы  $N$ . В соответствии с определением энтропийный показатель организованности системы  $R_S^{\max} \rightarrow 1$ , когда величина энтропии отражения является максимальной. В свою очередь, энтропия отражения достигает своего максимального значения, когда число элементов системы и количество ее частей равны ( $M_A = N$ ):

$$S^{\max} = -N \frac{1}{N} \log_2 N = \log_2 N. \quad (7)$$

При этом величина аддитивной неэнтропии отражения будет минимальной:

$$I_{\Sigma}^{\min} = \log_2(M_A + 1) - \log_2 N = \log_2 \frac{M_A + 1}{N}. \quad (8)$$

Соответственно, выражение для максимального значения энтропийного показателя организованности ( $R_S^{\max}$ ) имеет вид

$$R_S^{\max} = \frac{S^{\max}}{I_{\Sigma}^{\min} + S^{\max}} = \frac{\log_2 N}{\log_2 \frac{M_A + 1}{N} + \log_2 N}. \quad (9)$$

Энтропийный показатель организованности  $R_S^{\min} \rightarrow 0$ , когда аддитивная неэнтропия стремится к максимальному значению, и, соответственно, величина энтропии отражения минимальна [5].

Максимальное значение, в свою очередь, аддитивная неэнтропия принимает тогда, когда число элементов в одной части равно  $M_A - N + 1$  и каждая из остальных  $(N - 1)$  частей включает в себя только 1 элемент, т.е.

$$I_{\Sigma}^{\max} = \frac{M_A - N + 1}{M_A} \log_2(M_A - N + 2). \quad (10)$$

Таким образом, минимальная величина энтропии отражения составит

$$S^{\min} = \log_2(M_A + 1) - \frac{M_A - N + 1}{M_A} \log_2(M_A - N + 2). \quad (11)$$

В этом случае величина  $R_S^{\min}$  имеет вид

$$R_S^{\min} = \frac{S^{\min}}{I_{\Sigma}^{\max} + S^{\min}} = \frac{\log_2(M_A + 1) - \frac{M_A - N + 1}{M_A} \log_2(M_A - N + 2)}{\log_2 M_A + 1}. \quad (12)$$

Учитывая, что  $R = f(I_A, S, I_{\Sigma})$ , а  $I_{\Sigma}$  и  $S$  не могут превышать отражаемую информацию  $I_A$ , в то же время число частей системы  $N$  не может быть больше общего количества ее элементов  $M_A$ , то сказанное формализуется следующим образом:

$$N \rightarrow M_A \Rightarrow I_\Sigma \rightarrow 0, S \rightarrow \log_2(M_A + 1) \Rightarrow R \rightarrow 0, R_S \rightarrow 1;$$

$$N \rightarrow 1 \Rightarrow I_\Sigma \rightarrow \log_2(M_A + 1), S \rightarrow 0 \Rightarrow R \rightarrow 1, R_S \rightarrow 0.$$

Следует отметить, что при числе элементов системы  $M_A > 3$  значения энтропийного показателя организованности  $R_S$  могут принимать значения в области, ограниченной  $R_S^{\max}$  и  $R_S^{\min}$  - функциями. Это объясняется наличием множества сочетаний числа элементов при делении дискретной системы на части в плоскости признака ее рассмотрения.

Зависимости  $R^{\max}, R^{\min}, R_S^{\max}, R_S^{\min}$ , как функции от  $N$ , представлены на рис. 2.

В том случае, когда количество частей, по значениям признака в плоскости которого идет рассмотрение системы достигает общего числа элементов системы ( $N = M_A$ ), величина энтропийного показателя организованности достигает своего максимального значения ( $R_S^{\max} \rightarrow 1$ ) и наоборот, если деление на части отсутствует ( $N = 1$ ), то величина  $R_S^{\max} \rightarrow 0$ .

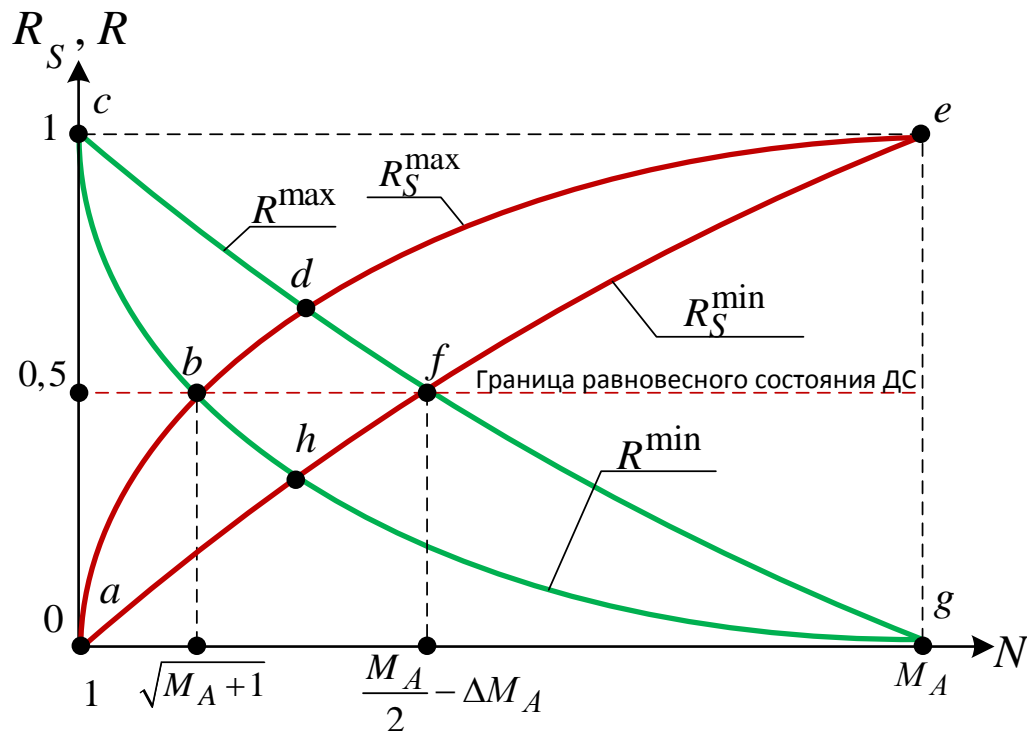


Рис. 2. Зависимость  $R$  и  $R_S$  от  $N$  при  $M_A = \text{const}$

Представленные графики изначально образуют два контура: энтропийный –  $abdefha$  и неэнтропийный (информационный) –  $cdfghbc$ , которые локализуют соответствующие области всех возможных значений энтропии и аддитивной неэнтропии отражения информации закрытых систем. Пересечение этих контуров по точкам  $b$  и  $f$ , где наблюдаются равенства  $R_S^{\max} = R^{\min}$  и  $R_S^{\min} = R^{\max}$ , позволяет по их проекциям выделить на горизонтальной оси три интервала (левый, центральный, правый) с присущими каждому интервалу особенностями соотношений  $R$  и  $R_S$ . Рассмотрим эти особенности, предварительно определив значения  $N$ , соответствующие точкам  $b$  и  $f$ .

В точке  $b$ , согласно правым частям выражений (7) и (8), имеем уравнение  $\log_2 N = \log_2 \frac{M_A + 1}{N}$ , у которого существует единственное решение  $N = \sqrt{M_A + 1}$ . При этом необходимо отметить, что поскольку  $N$  может принимать только целочисленные значения, то границы интервалов определяются с точностью до ближнего большего целого. Аналогичное уравнение для точки  $f$ , образованное правыми частями выражений (10) и (11), соответствующее проекции точки  $f$ , может быть определено численным путем. И в качестве значения  $N$ , соответствующего точке  $f$ , принимается то значение, после которого  $R_S^{\min} > R^{\max}$ . Но при этом, как показывают расчеты, значение  $N$  остается меньше  $\frac{M_A}{2}$  на некоторую величину  $\Delta M_A$ , которая увеличивается по мере роста числа элементов системы (рис. 2). Таким образом, точке  $f$  на оси  $N$  соответствует значение  $N = \frac{M_A}{2} - \Delta M_A$ .

Сами по себе значения  $R$ -функции говорят о том, что и в какой мере преобладает в структуре системы: хаос или порядок. Таким образом, получено знание о взаимосвязи поведения элементов динамической системы и информации о его структурной организованности, позволяющее все состояния дискретных динамических систем, в зависимости от общего количества их элементов и числа частей (подмножеств, сформированных по одному из признаков), классифицировать на три класса:

- *организованный* ( $\Omega_1$ ) – левый интервал  $1 \leq N < \sqrt{M_A + 1}$ ;
- *частично организованный* ( $\Omega_2$ ) – центральный интервал  $\sqrt{M_A + 1} \leq N \leq \frac{M_A}{2} - \Delta M_A$ ;
- *хаотичный* ( $\Omega_3$ ) – правый интервал  $\frac{M_A}{2} - \Delta M_A < N \leq M_A$ .

Так, если энтропийный показатель организованности  $R_S < 0,5$ , то будем считать, что в структуре системы преобладает порядок, в противном случае, когда  $R_S > 0,5$  – хаос. При  $R_S = R = 0,5$  хаос и порядок уравниваются друг друга, и состояние системы с позиции организационного подхода является равновесным (см. рис. 2).

С практической точки зрения при анализе состояния систем увеличение энтропийного показателя организованности  $R_S$  может свидетельствовать о признаках реорганизации системы или ее разрушения. В то же время уменьшение значения  $R_S$  свидетельствует о развитии системы, ее более высокой степени организованности. Использование описанного решающего правила отнесения к одному из трех типичных состояний системы означает фактический переход от признаков пространства в пространство оценок организованности дискретной системы, по величине которой представляется возможным разделять множество состояний наблюдаемой системы на классы.

Переходы между значениями показателя организованности, которые принимает динамическая система в различные моменты времени, будем называть траекторией эволюции организованности системы в информационном поле отражения дискретных систем.

В качестве примера ВТС рассмотрим ССДТС. Пространство возможных состояний системы в процессе ее перехода из структурно-упорядоченного состояния в состояние хаоса представлено на рис. 3.

Анализируя рисунок, можно сделать вывод, что чем больше число направлений, по которым двигаются элементы системы, тем выше значение энтропийного показателя организованности.

Графическое отображение пространства возможных состояний ССДТС, состоящей из 16 ТРД, в информационном поле отражения дискретных систем для случая, когда система делится на две части по признаку «направление движения», представлено на рис. 4.

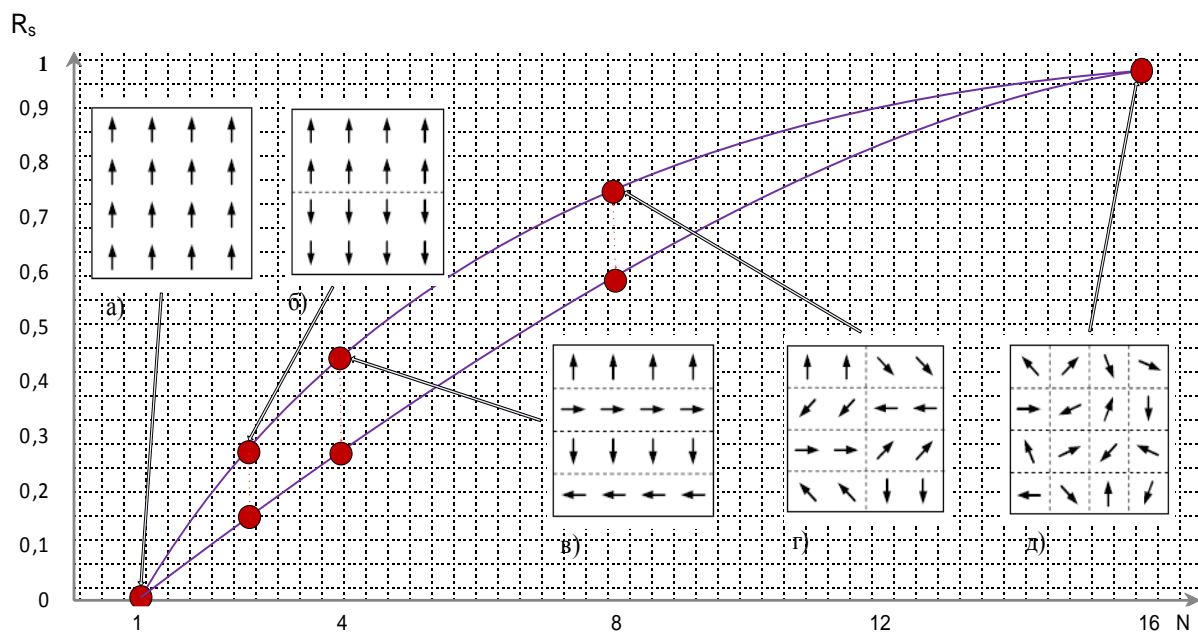


Рис. 3. Пример пространства возможных состояний системы при  $M_A = 16$   
 (число направлений движения ТРД):  
 $a - N=1$ ;  $б - N=2$ ;  $в - N=4$ ;  $г - N=8$ ;  $д - N=16$

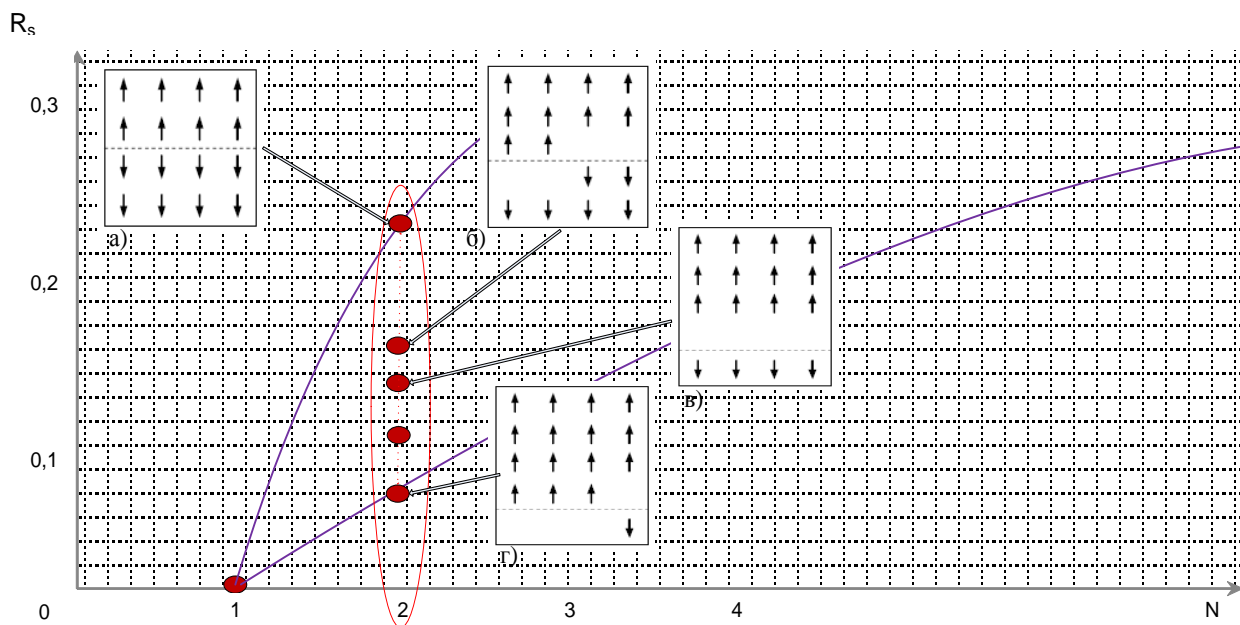


Рис. 4. Пример пространства возможных состояний системы при  $N=2$ ;  
 $M_A = 16$ ;  $m_i(t_k)$

При рассмотрении рис.4 видно, что чем больше элементов системы обладают общим признаком, тем меньше значение показателя  $R_s$  системы.

## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОРГАНИЗОВАННОСТИ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Проведенные исследования моделей ССДТС в информационном поле отражения дискретных систем показали, что каждое состояние системы может быть охарактеризовано значением показателя организованности и независимо от изменений, происходящих в системе, его значения будут находиться в области ограниченной функциями  $R_s^{\max}$ ,  $R_s^{\min}$  и  $R^{\max}$ ,  $R^{\min}$  (см. рис.2).

Полученная взаимосвязь изменения параметров отдельных элементов системы и информации о ее организованности позволяет классифицировать все состояния дискретной системы, в зависимости от общего количества ее элементов и числа частей, сформированных в плоскости признаков функционирования системы. При этом сами показатели организованности дискретной системы могут выступать в качестве информативных признаков для оценки состояния сложных динамических систем.

Таким образом, суть предлагаемого метода оценивания показателя организованности СДС заключается в переходе от множества оценок параметров элементов, регистрируемых в процессе мониторинга ВТС, к информационному полю отражения дискретной системы на основе усовершенствованного математического аппарата теории информации [5] с последующей классификацией состояния наблюдаемой ВТС.

Выделим три основных этапа метода оценивания показателя организованности СДС.

На *первом этапе* осуществляется представление наблюдаемой системы в информационном поле отражения дискретных систем. Для этого производится рассмотрение системы в плоскости одного из наблюдаемых признаков ее функционирования (пространственное положение, рабочие частоты, скорость движения элементов и др.).

Все элементы системы объединяются в  $N$  подмножеств по  $m_i$  элементов с одинаковым значением признака (например, направление движения). На основе выражений (1) и (2) для каждого момента времени  $t_k$  рассчитываются значения аддитивной негэнтропии и энтропии отражения.

На *втором этапе* осуществляется представление полученных значений аддитивной негэнтропии и энтропии отражения СДС в пространстве оценок структурной организованности для каждого момента времени  $t_k$ . С этой целью рассчитываются показатели организованности  $R(t_k)$  согласно (5). В общем виде они могут быть записаны в виде вектора

$$R_i(t_k) = \langle R_1(t_k), R_2(t_k), \dots, R_q(t_k) \rangle,$$

где  $t_k$  –  $k$ -й момент времени наблюдения, ( $1 \leq i \leq q$ );

$q$  – число информативных признаков функционирования системы.

В результате получим множество оценок структурной организованности системы по каждому из наблюдаемых признаков ее функционирования  $\{R_i(t_k)\}$ .

На *третьем этапе* производится распознавание состояния ВТС в момент времени  $t_k$  по каждому из информационных признаков путем отнесения оценок  $R_i(t_k)$  к одному из предопределенных классов  $\{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3\}$ .

Таким образом, идея, положенная в основу предлагаемого метода, заключается в переходе от признакового пространства в пространство оценок структурной организованности на основе усовершенствованного математического аппарата теории информации с последующей классификацией мгновенных «портретов» подвижного объекта с помощью предложенного комплексного признака – показателя организованности.

В табл. 2 приведены сравнительные данные предлагаемого метода и существующего для вариантов систем, представленных на рис. 5.

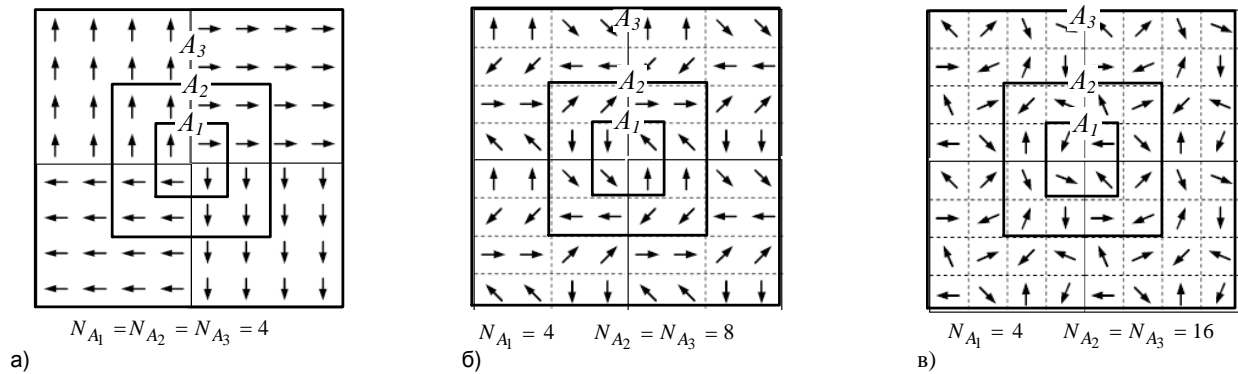


Рис. 5. Примеры состояния систем с числом элементов:

а –  $M_{A_1}=4$ ; б –  $M_{A_2}=16$ ; в –  $M_{A_3}=64$

Таблица 2

**Значения энтропийного показателя организованности и энтропии Шеннона для систем  $A_1, A_2, A_3$**

Вариант разбиения систем $A_1, A_2, A_3$ на $N$ частей ( $M_{A_1}=4, M_{A_2}=16, M_{A_3}=64$ )	а) $N_{A_1} = N_{A_2} = N_{A_3} = 4$			б) $N_{A_1} = 4, N_{A_2} = N_{A_3} = 8$			в) $N_{A_1} = 4, N_{A_2} = N_{A_3} = 16$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
Информационно-энтропийная мера Шеннона	2	2	2	2	3	3	2	4	4
Энтропийный показатель организованности $R_s$	0,861	0,489	0,332	0,861	0,734	0,498	0,861	0,979	0,664

Как видно из таблицы, применение показателя организованности  $R_s$  в отличие от энтропийной меры Шеннона позволяет различать состояния систем  $A_1, A_2, A_3$  между собой.

Таким образом, предложенный метод оценивания показателя организованности позволяет оценить состояние наблюдаемой СДС по совокупности наблюдений параметров функционирования ее отдельных элементов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках общей задачи синтеза научно-методического аппарата оценивания состояния организационной структуры СДС разработан основанный на энтропийном анализе дискретных систем метод, обеспечивающий разделение множества возможных состояний СДС на классы состояний.

Предложенный метод оценивания показателя организованности в задачах мониторинга военно-технических систем позволяет распознавать изменения состояния СДС в условиях априорной неопределенности о значениях параметров функционирования сети в целом.

Предложенный показатель структурной организованности  $R_s$  отражает не только хаотичность и упорядоченность СДС с постоянным количеством элементов, но и позволяет через приращение значений структурной организованности объективно сопоставлять между собой системы с различным количеством элементов.

Преимущество предложенного к использованию метода заключается в его универсальности. Для оценки организованности СДС могут использоваться признаки различной природы:



направление движения элементов системы, распределение частотного ресурса между ними, скорость движения и др.

### Список используемых источников

1. *Маковский В.Н., Зайцев И.Е., Сайбель А.Г.* Координатометрия мобильных абонентов: проблемы, методы и решения // *Информация и космос: науч.-техн. журн.* – СПб.: Санкт-Петербургская науч.-техн. общественная организация «Институт телекоммуникаций», 2005. – №2. – С.30–36.
2. Методы оценивания пространственных характеристик мобильных абонентов / В.Н. Маковский, И.В. Чеботарь, В.В. Кузьмин и др. // *Антенны.* – 2014. – Т. 10, №11. – С.38–42.
3. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 830 с.
4. *Хартли Р.В.Л.* Передача информации // *Теория информации и ее приложения: сб.* – М.: Физматгиз, 1959. – С. 5–35.
5. *Вяткин В.Б.* Синергетический подход к определению количества информации // *Информационные технологии.* – 2009.– № 12. – С. 68–73.
6. *Маковский В.Н., Еремеев И.Ю., Свистунов Ф.Н.* Энтропийный метод распознавания состояния системы связи с динамической топологией сети // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – 2016. – Вып. 650. – С. 41–47.

Б.В. Илларионов,  
*доктор техн. наук, профессор*  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского  
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж;  
Д.С. Малиев,  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского  
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ ОДНОВРЕМЕННО НАБЛЮДАЕМЫХ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ

Представлены результаты моделирования процедур распознавания излучений одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов с использованием тестовых сигналов на основе учета особенностей векторного параметра положения геостационарного спутника, и получены количественные оценки качества распознавания путем оптимальной обработки тестовых сигналов, прошедших тракты ретрансляции.

Ключевые слова: радиоконтроль, спутниковая связь, распознавание излучений, тестовый сигнал.

Современное состояние и тенденции развития высокоскоростных широкополосных информационно-коммуникационных систем характеризуются разработкой и развертыванием в рамках используемого диапазона электромагнитного спектра большого числа систем спутниковой связи (СС) различного назначения. Усложнение электромагнитной обстановки и увеличение преднамеренных и непреднамеренных помех геостационарным спутниковым системам обуславливает необходимость радиоконтроля заявленных характеристик трактов ретрансляции систем СС. Одной из задач такого контроля, решение которой в направлении «космос-Земля» может быть осуществлено только с использованием специальных станций контроля и «чужих» спутников, является определение принадлежности функционирующих линий СС определенным спутникам в условиях ужесточения требований со стороны Международного союза электросвязи к точности удержания геостационарных спутников-ретрансляторов систем СС в заданных координатах [1, 2].

В связи с вышеизложенным актуальной задачей является осуществление радиоконтроля способом диагностики трактов ретрансляции спутников связи, суть которого заключается в излучении в направлении заданной орбитальной позиции специально сформированных тестовых сигналов (ТС) и определении параметров контролируемой системы, а также выявлении возможных изменений ее конфигурации на основе результатов обработки ТС в точке приема. Проведение радиоконтроля при этом не должно приводить к нарушению режимов работы контролируемой системы СС и практически может осуществляться только в рамках допусков возможного увеличения мощности шумов (помех), определяемых Регламентом радиосвязи [3, 4].

Каждый геостационарный спутник-ретранслятор может характеризоваться векторным параметром положения  $\vec{P}\{a, b, c\}$ , который включает в себя параметры пространственного положения спутника  $\{a\}$ , энергетические  $\{b\}$  и частотно-временные параметры трактов ретрансляции и сигналов линий СС  $\{c\}$ . При этом изменение пространственного размещения и дрейф спутника могут вызывать изменение частотно-временных параметров линий СС. Данное обстоятельство позволяет использовать различия в значениях компонентов векторно-

го параметра положения одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов для решения задачи распознавания их излучений при ретрансляции сигналов.

При решении задачи распознавания излучений спутников-ретрансляторов и определения принадлежности обслуживаемых линий СС объектами распознавания будут являться тракты ретрансляции наблюдаемых сигналов, к параметрам (признакам распознавания) которых можно отнести: мощность, вид поляризации, длину волны (частоту излучения) [5].

Целью настоящего исследования являются разработка и моделирование алгоритмов распознавания излучений одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов с использованием ТС на основе учета особенностей векторного параметра положения геостационарного спутника и получение количественных оценок качества распознавания путем оптимальной обработки тестовых сигналов, прошедших тракты ретрансляции.

В основу проведения детерминированных и статистических расчетов в задаче распознавания линий СС положено использование обобщенной модели тракта ретрансляции и обработки ТС при одновременном наблюдении излучений двух спутников-ретрансляторов. Эта модель представлена на рис. 1.

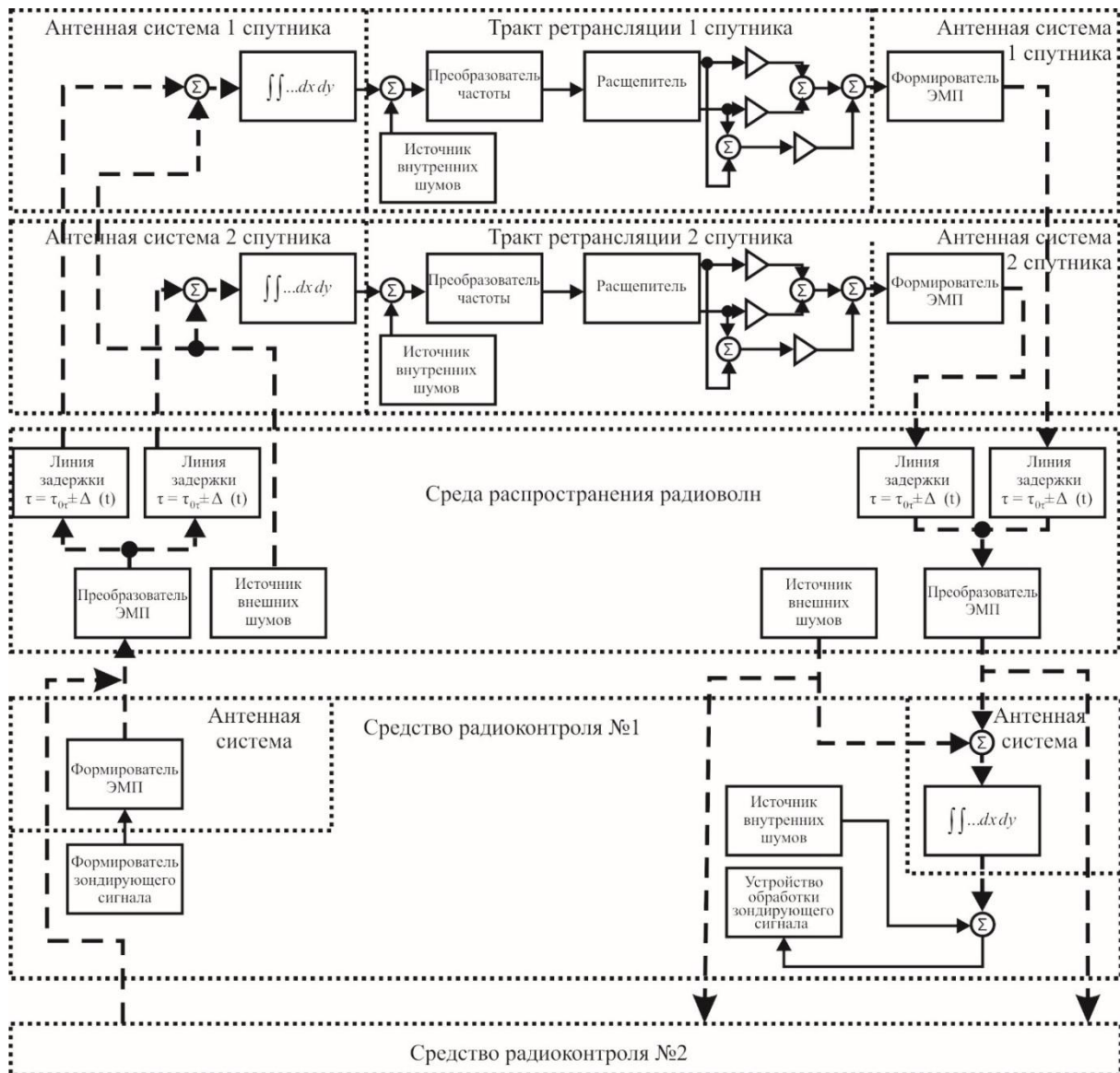


Рис. 1. Обобщенная модель трактов ретрансляции и обработки тестовых сигналов при одновременном наблюдении излучений двух спутников-ретрансляторов

Каждый из ТС распространяется до наблюдаемого спутника за время  $\tau_1$  и время  $\tau_2$ , которые определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \tau_{01} \pm \Delta\tau_1(t), \\ \tau_2 &= \tau_{02} \pm \Delta\tau_2(t).\end{aligned}\quad (1)$$

В последней формуле введены следующие обозначения:  $\tau_{01}$ ,  $\tau_{02}$  – время распространения, определяемое высотой и наклонной дальностью орбиты в начальный момент с учетом геометрии взаимного положения спутника-ретранслятора на орбите и точки наблюдения;  $\Delta\tau_1(t)$ ,  $\Delta\tau_2(t)$  – изменение времени распространения сигналов, вследствие различного характера дрейфа одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов.

Дополнительная изменяющаяся во времени составляющая задержки ТС приводит к изменению пространственной длительности сигнала, например, при наличии участка с монотонным изменением этой задержки. Данный факт предопределяет появление доплеровского сдвига частоты ТС. Сигналы, излученные на частотах  $f_{\uparrow 1}$ ,  $f_{\uparrow 2}$ , будут приняты на частотах:

$$\begin{aligned}f_{\downarrow 1} &= f_{\uparrow 1} + f_{d1}, \\ f_{\downarrow 2} &= f_{\uparrow 2} + f_{d2},\end{aligned}\quad (2)$$

где  $f_{d1}$ ,  $f_{d2}$  – доплеровские смещения частот сигналов, обусловленные дрейфом одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов вокруг подспутниковых точек.

Оценка времени распространения сигналов, вследствие различного характера дрейфа одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов и влияния доплеровского сдвига частоты переизлучаемых ТС, проведена с использованием аксонометрической модели дрейфа спутника-ретранслятора вокруг точки стояния на геостационарной орбите относительно точки наблюдения, которая с достаточной степенью точности аппроксимирует характер изменения во времени углового положения спутника относительно точек наблюдения на поверхности Земли, а также учитывает нестационарный характер процесса изменения доплеровского сдвига частоты.

В условиях неопределенности исходных данных об угловых размерах и точном виде фигуры, по которой в данный момент времени происходит дрейф ИСЗ, моделирование смещения спутника-ретранслятора удобно осуществлять с использованием кривых четвертого порядка овалов Кассини с изменением их параметров. Параметры овалов Кассини определяют размер и форму фигур, обеспечивая возможность моделирование дрейфа спутника в плоскости ортогональной линии от подспутниковой точки на поверхности Земли в виде эллипса, эллипса с двумя вогнутыми участками и лемнискаты Бернулли как сечений трехмерных фигур [6].

Учитывая использование выбранных параметров овалов Кассини, на рис. 2 представлены варианты моделирования фигур дрейфа спутника-ретранслятора вокруг подспутниковой точки: а – эллипс, б – эллипс с двумя вогнутыми участками, в – лемнискаты Бернулли [7].

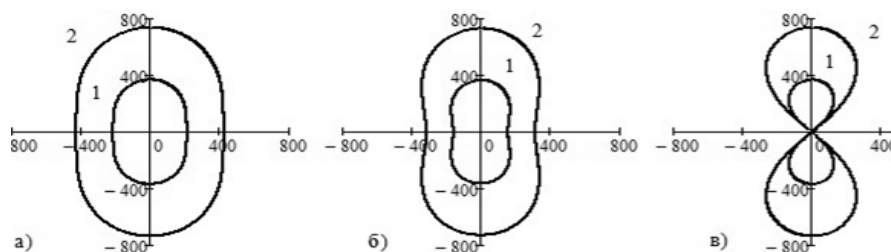


Рис. 2. Варианты моделирования фигуры дрейфа спутника вокруг подспутниковой точки на геостационарной орбите (кривые 1 – с отклонением  $1^\circ$ , кривые 2 – с отклонением  $2^\circ$  от подспутниковой точки)

Моделирование дрейфа спутника-ретранслятора вокруг подспутниковой точки позволяет произвести расчеты для определения меняющейся дальности (задержки тестового сигнала)

от точки наблюдения до спутника, а также для вычисления доплеровского смещения частоты принятого сигнала, вызванного движением спутника по трехмерным фигурам вокруг подспутниковой точки.

На рис. 3 изображены зависимости времени задержки сигнала одновременно наблюдаемых двух спутников-ретрансляторов от времени суток и размера фигуры дрейфа с учетом и без учета дрейфа ИСЗ вокруг подспутниковой точки. Данные зависимости показывают различные значения времени запаздывания двух одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов с учетом и без учета дрейфа при различном отклонении от подспутниковой точки.

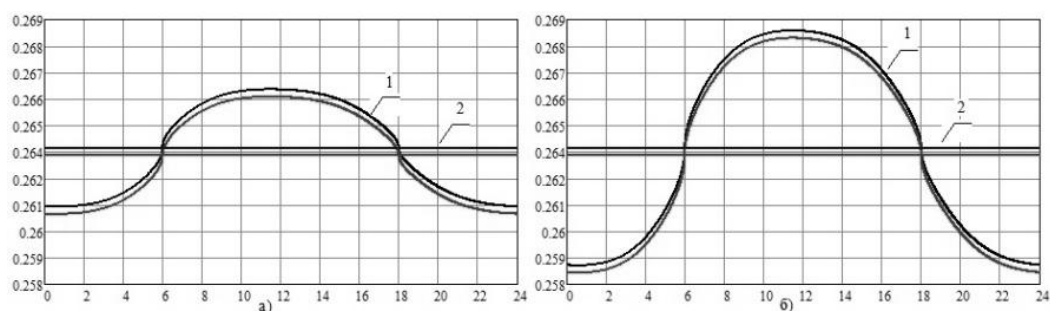


Рис. 3. Зависимости времени задержки сигнала одновременно наблюдаемых двух спутников-ретрансляторов от времени суток и размера фигуры дрейфа: а – отклонение  $1^\circ$ ; б – отклонение  $2^\circ$  (кривые 1 – с учетом дрейфа; кривые 2 – без учета)

На рис. 4 представлены зависимости относительной задержки сигнала одновременно наблюдаемых двух спутников-ретрансляторов от времени суток для различных точек наблюдения. Данные зависимости позволяют выявить более существенные отличия задержек сигналов при движении спутников по разным фигурам и наблюдении из разных точек на поверхности Земли.

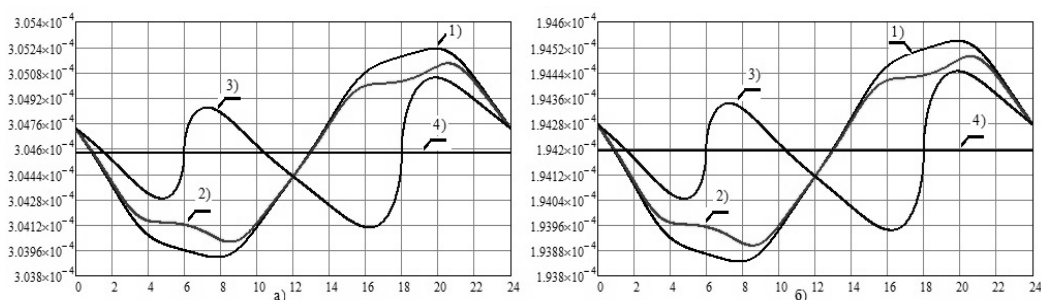


Рис. 4. Зависимости относительного времени задержки сигнала одновременно наблюдаемых двух спутников-ретрансляторов (разнос спутников  $1^\circ$ ) от времени суток для различных точек наблюдения – Воронеж (а), Санкт-Петербург (б) – и различных фигур дрейфа: 1 – эллипс; 2 – эллипс с двумя вогнутыми участками; 3 – лемниската Бернулли; 4 – без учета дрейфа

Расчет относительной задержки сигнала с учетом дрейфа геостационарного спутника-ретранслятора вокруг подспутниковой точки позволяет выявить отличия в задержках сигналов от близко расположенных и одновременно наблюдаемых (в пределах лепестка диаграммы направленности антенны) спутников, движущихся по разным фигурам дрейфа.

Расчет значений доплеровской скорости смещения спутника-ретранслятора для данной модели проводится на основе анализа изменения геометрических соотношений во взаимном положении спутника и точек наблюдения.

Для вычисления значений скорости  $V_d$  в каждой точке трехмерной фигуры дрейфа необходимо определить проекцию вектора скорости  $V$  на точку наблюдения, после чего получим

$$V_d = V \sin \alpha \cos \theta, \quad (3)$$

где  $V$  – мгновенная скорость движения спутника по трехмерной фигуре, определяемая как производная полярного угла  $d\varphi/dt$  в зависимости от размера фигуры дрейфа;

$\alpha$  и  $\theta$  – углы, под которыми просматривается спутник-ретранслятор, движущийся по трехмерной фигуре в разных плоскостях.

На рис. 5 представлены зависимости изменения угла наблюдения спутника  $\alpha$  от положения ИСЗ-ретранслятора на описываемых фигурах применительно к различным сечениям трехмерных фигур дрейфа. Анализ представленных зависимостей показывает наличие монотонного периодического характера угла наблюдения ИСЗ в направлении точек размещения точки наблюдения.

Изменение частоты переизлученного ТС, вследствие эффекта Доплера, обусловленного циклическим изменением положения ИСЗ-ретранслятора на геостационарной орбите, может быть определено с использованием выражения

$$F_d = F_{TC} \left( \frac{2V_d}{c} + \frac{V_d^2}{c^2} \right), \quad (4)$$

где  $F_{TC}$  – частота ТС.

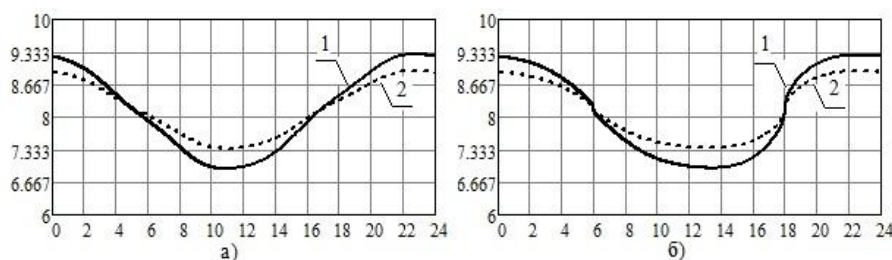


Рис. 5. Зависимости изменения угла наблюдения от положения ИСЗ-ретранслятора для различных фигур и точек наблюдения:  
а – эллипс; б – лемниската (кривые 1 – сечение фигуры дрейфа  $0^\circ$ , кривые 2 – сечение  $50^\circ$ )

Представленные на рис.6 зависимости изменения частоты переизлученных ТС, обусловленные дрейфом спутника по трехмерным фигурам и переменной направлением вектора скорости дрейфа, показывают, что результаты суточных наблюдений за изменением возникающего доплеровского сдвига частоты дают основания для выводов о типе конкретной фигуры дрейфа и месте на ней ИСЗ-ретранслятора; резкие скачки (разрывы зависимостей) обусловлены сменой знака доплеровской скорости спутника в направлении на точку наблюдения.

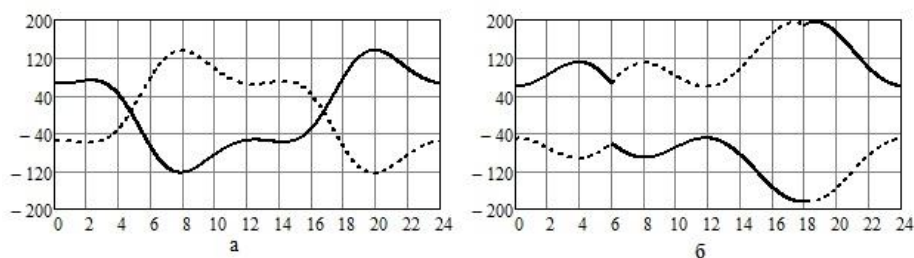


Рис. 6. Зависимости изменения доплеровского смещения частоты ТС от времени суток для спутников, движущихся по одинаковым фигурам дрейфа в противоположных направлениях:  
а – эллипс; б – лемниската Бернулли

Расчет доплеровского сдвига частоты сигнала, обусловленный дрейфом геостационарного спутника-ретранслятора вокруг подспутниковой точки, позволяет выявить отличия частот принятых сигналов, вызванных различным типом фигур дрейфа и различными скоростными режимами спутника вокруг подспутниковой точки.

Таким образом, в условиях одновременного наблюдения излучений трактов ретрансляции различных спутников связи информативными признаками качества распознавания принадлежности линий СС различным ИСЗ-ретрансляторам являются задержка ТС, модуль и знак доплеровского сдвига частоты ТС, возникающего в результате дрейфа геостационарных спутников.

С учетом представленного описания обобщенной модели тракта ретрансляции решение задач распознавания обеспечивается на основе обработки ТС, поступающих на вход приемных устройств в составе смеси:

$$\vec{y}(t) = \vec{s}(t, \vec{\Lambda}) + \vec{n}(t), \quad (5)$$

где  $\vec{y}(t)$  – вектор принимаемой реализации входного случайного процесса;  
 $\vec{s}(t, \vec{\Lambda})$  – вектор принимаемых ТС;  
 $\vec{\Lambda}$  – вектор параметров ТС, входящий в векторный параметр положения  $\vec{P}\{a, b, c\}$ ;  
 $\vec{n}(t)$  – вектор шумов наблюдения, характеризующий все шумы приема ТС, включая в общем случае и сигналы линий СС как помехи приему ТС, а также помехи, обусловленные взаимодействием сигналов и шумов в нелинейном ретрансляторе.

Применительно к распознаванию принадлежности вновь наблюдаемых сигналов линий СС пространственно разнесенным геостационарным спутникам-ретрансляторам решение задачи может быть проведено посредством попарного различения или виртуального «обнаружения – разрешения» ретранслированных ТС в условиях действия аддитивных гауссовских белых шумов.

В первом случае уравнение наблюдения при распознавании посредством попарного различения ТС в условиях пересечения спектров компонентов суммарного сигнала будет иметь вид

$$y(t) = \theta [s_1(t - \tau_1) + s_2(t - \tau_1)] + (1 - \theta) [s_1(t - \tau_1) + s_2(t - \tau_2)] + n_0(t), \quad (6)$$

где  $\theta$  – случайная величина, принимающая значения 0 и 1;  
 $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  – тестовые сигналы с одинаковыми огибающими, являющиеся известными функциями времени;  
 $\tau_1, \tau_2$  – задержки ТС при ретрансляции;  
 $n_0(t)$  – гауссовский белый шум наблюдения с функцией корреляции,

$$R(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau).$$

Согласно уравнению наблюдения (6) принятый суммарный ретранслированный сигнал может содержать либо смесь тестовых сигналов, ретранслированных одним спутником, либо смесь ТС, ретранслированных одновременно наблюдаемыми спутниками-ретрансляторами. Определение состава смеси позволит сделать вывод о наличии вновь наблюдаемого спутника-ретранслятора или дать информацию о том, что тестовые сигналы ретранслированы одним и тем же спутником.

Для случая распознавания применительно к виртуальному «обнаружению – разрешению» ретранслированных ТС с пересечением областей их частотно-временных параметров уравнение наблюдения задает решение задачи в условиях действия гауссовского белого шума наблюдения и структурно-коррелированных помех:

$$y(t) = \theta_1 s_1(t, a_1, \Delta\omega_1, \Delta\tau_1) + \theta_2 s_2(t, a_2, \Delta\omega_2, \Delta\tau_2) + n_0(t), \quad t \in [0, T], \quad (7)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – независимые случайные величины, которые могут принимать значения 0 и 1;

$$s_1(t, a_1, \Delta\omega_1, \Delta\tau_1) = a_1 A(t - \Delta\tau_1) \cos[\omega_1 + \Delta\omega_1(t - \Delta\tau_1) + \varphi(t - \Delta\tau_1)] + \cos[\omega_2 + \Delta\omega_2(t - \Delta\tau_1) + \varphi(t - \Delta\tau_1)], \quad (8)$$

$$s_2(t, a_2, \Delta\omega_2, \Delta\tau_2) = a_2 A(t - \Delta\tau_2) \cos[\omega_3 + \Delta\omega_2(t - \Delta\tau_2) + \varphi(t - \Delta\tau_2)] + \cos[\omega_4 + \Delta\omega_2(t - \Delta\tau_2) + \varphi(t - \Delta\tau_2)], \quad (9)$$

где  $a_1, a_2$  – амплитуда ТС;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  – частоты составного ТС [8], которые используются для реализации беспоиского по задержке алгоритма обработки ТС при их приеме;

$\Delta\omega_1, \Delta\omega_2$  – доплеровский сдвиг частоты ТС;

$\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$  – задержки ТС при ретрансляции, обусловленные пространственным дрейфом наблюдаемых спутников;

$n_0(t)$  – гауссовский белый шум с дельта-функцией корреляции.

Уравнение наблюдения (7) позволяет учитывать при разработке алгоритма распознавания как деструктивное влияние шумовой помеховой составляющей, так и коррелированный характер взаимного влияния ТС.

Применительно к уравнению (7) задача оптимального устройства распознавания состоит в оценке параметров  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , обеспечивающей минимум среднего риска, который может быть сведен к максимизации функционала правдоподобия [9]. Решение задачи обеспечивает формирование математического алгоритма распознавания принадлежности вновь наблюдаемых сигналов линий СС пространственно разнесенным геостационарным спутником-ретранслятором в виде

$$\begin{cases} \theta_1^* = \frac{1}{\sqrt{E_1 E_2} (1 - \rho_{12}^2)} \int_0^T y_t [s_{t1}(a_1, \Delta\omega_1, \Delta\tau_1) - \rho_{12} s_{t2}(a_2, \Delta\omega_2, \Delta\tau_2)] dt > l_n \\ \theta_2^* = \frac{1}{\sqrt{E_1 E_2} (1 - \rho_{12}^2)} \int_0^T y_t [s_{t2}(a_2, \Delta\omega_2, \Delta\tau_2) - \rho_{12} s_{t1}(a_1, \Delta\omega_1, \Delta\tau_1)] dt > l_n \end{cases}, \quad (10)$$

где  $l_n$  – пороговый уровень принятия решения.

При этом независимо от вида (содержания) рассматриваемого признака распознавания включение алгоритма распознавания и вероятностная оценка информативности признака количественно могут проводиться в виде последовательной (параллельно-последовательной, параллельной) процедуры определения значений коэффициентов взаимной корреляции сигналов

$$\rho_{12} = \frac{1}{\sqrt{E_1 E_2}} \int_0^T s_{t1}(a_1, \Delta\omega_1, \Delta\tau_1) s_{t2}(a_2, \Delta\omega_2, \Delta\tau_2) dt$$

по каждому из признаков.

Применительно к задаче распознавания излучений спутниковых ретрансляторов (в рамках распознавания принадлежности вновь наблюдаемых сигналов линий СС) при наличии их пространственного (временного) разнесения данный коэффициент может быть определен в виде

$$\rho_{12} = 1 - (\Delta\tau \pm \tau')/T, \quad (11)$$

где  $T$  – длительность ТС или его элемента, определяющая их интервал корреляции,  $T = \tau_{\text{кор}}$ ;



$\Delta\tau$  – относительное время запаздывания ТС,  $\Delta\tau = \tau_{02} - \tau_{01}$ ;

$\tau'$  – дополнительный временной сдвиг, обусловленный дрейфом спутника на геостационарной орбите; при выполнении условия  $(\Delta\tau \pm \tau')/T > 1$  величина  $\rho_{fd}$  полагается равной нулю,  $\tau' = \Delta\tau_2(t) - \Delta\tau_1(t)$ .

Применительно к задаче распознавания излучений спутниковых ретрансляторов при наличии доплеровских сдвигов частоты переизлученных ТС коэффициент корреляции принимаемых сигналов при когерентной обработке может быть определен в виде

$$\rho_{fd} = \frac{\sin(2\pi(f_{d1} - f_{d2})T)}{2\pi(f_{d1} - f_{d2})T}, \quad (12)$$

где  $f_{d1}, f_{d2}$  – доплеровские сдвиги переизлученных ТС, обусловленные дрейфом геостационарного спутника-ретранслятора вокруг подспутниковой точки;

$T$  – длительность ТС.

С использованием выражения (11) построены зависимости коэффициента корреляции и вероятности правильного распознавания излучений одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов от пространственного положения средства радиоконтроля при наличии пространственно-временного разнесения спутников, движущихся по одинаковым фигурам дрейфа, которые представлены на рис. 7,а. Зависимости коэффициента корреляции и вероятности правильного распознавания излучений одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов от пространственного положения средства радиоконтроля при наличии доплеровских сдвигов частот переизлученных ТС, а также пространственного и временного разнесения спутников, движущихся по одинаковым фигурам дрейфа, построены с использованием выражения (12) и представлены на рис. 7,б. Зависимости получены для минимальных значений отношения сигнал/шум и различной длительности интервала корреляции ТС и наглядно иллюстрируют влияние интервала корреляции и отношения сигнал/шум на качество распознавания.

Проявление зон снижения качества распознавания вследствие дрейфа спутника-ретранслятора требует контроля и управления частотно-временными параметрами ТС в интересах снижения величины интервала корреляции сигналов. Для сложных сигналов возможно кратное базе снижение интервала корреляции сигнала при оценке качества распознавания.

Алгоритм распознавания (селекции) излучений на основе попарного виртуального разрешения ТС в условиях коррелированных помех должен включаться в работу при условии, если разность оцениваемых значений задержек ТС будет соизмерима с интервалом корреляции (интервалом неопределенности по задержке) сигналов, который для сигналов с большой величиной базы на порядки меньше их длительности. Вне интервала неопределенности распознавание излучений будет обеспечивать алгоритм оптимального обнаружения ТС на фоне некоррелированных гауссовых помех.

Разработанные алгоритмы распознавания излучений одновременно наблюдаемых спутников-ретрансляторов с использованием тестовых сигналов, прошедших тракты ретрансляции, обеспечивают возможность определения принадлежности сигналов линиям СС различным спутникам-ретрансляторам в пространстве признаков векторного параметра положения  $\bar{P}\{a, b, c\}$  при действии структурно-коррелированных и некоррелированных помех. Полученные количественные оценки качества распознавания свидетельствуют о наличии объективной возможности достоверного «разделения» одновременно наблюдаемых близко

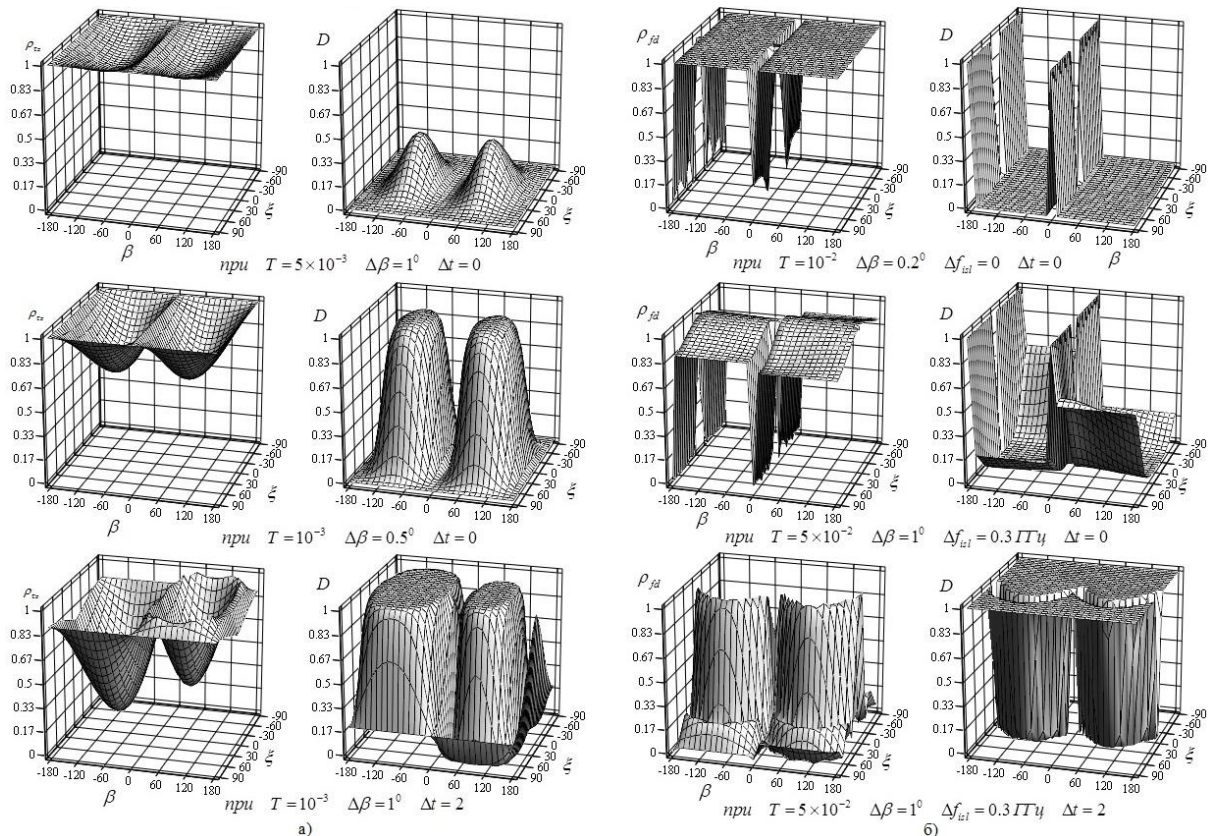


Рис. 7. Зависимости коэффициента корреляции и вероятности правильного распознавания от пространственного положения точки наблюдения

расположенных спутников-ретрансляторов способом диагностики трактов ретрансляции тестовыми сигналами за счет оценки значений отличающихся параметров этих сигналов.

### Список используемых источников

1. Регламент радиосвязи // МСЭ. – Женева. – 2012. – Т. 2. – 826 с.
2. Спутниковые системы связи и вещания. – М.: Радиотехника, 2015. – 330 с.
3. Правила осуществления радиоконтроля в Российской Федерации: Постановление Правительства РФ №175 от 01. 04 .2005 г.
4. Положение «О радиочастотной службе»: Постановление Правительства РФ № 279 от 03. 05. 2005 г.
5. Буров Р.И., Илларионов Б.В. Потенциальные возможности распознавания радиоизлучений при контроле электромагнитной обстановки в системах спутниковой связи // Телекоммуникации. – 2006. – № 9. – С. 27–32.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
7. Малиев, Д.С., Илларионов Б.В. Моделирование пространственного дрейфа геостационарных спутников относительно точки наблюдения на поверхности Земли в интересах решения задачи распознавания излучений спутниковых ретрансляторов // Вестник Военно-Воздушной академии. – 2017. – № 3(30). – С. 227–234.
8. Диксон Р.К. Широкополосные системы. – М.: Связь, 1979. – 301 с.
9. Чердынцеv В.А. Радиотехнические системы. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 369 с.

А.В. Костромитинов;  
А.А. Кобыстин,  
*кандидат техн. наук;*  
А.Б. Лебедев,  
*кандидат техн. наук;*  
П.А. Прохоренко;  
М.А. Тюленева

## **ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯ ВЕТРА В ЦИКЛОНЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

В статье представлена физико-статистическая модель поля ветра в циклоне, которая базируется на данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Модель построена на основе выявленной в циклоне зависимости поля ветра от поля облачности при использовании получаемых с помощью отечественных космических аппаратов гидрометеорологического назначения априори достоверных данных дистанционного зондирования Земли. Использование разработанной модели совместно с моделью геострофического ветра и объективным анализом поля геопотенциала методом сплайн-аппроксимации позволяет получать уточненное поле геопотенциала по территориям, не освещенным гидрометеорологическими наблюдениями.

Ключевые слова: физико-статистическая модель, достоверность гидрометеорологической информации, космические аппараты гидрометеорологического назначения, поле геопотенциала, поле облачности в циклоне, поле ветра в циклоне.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных полей гидрометеорологических величин, определяющих погоду, является поле атмосферного давления. Поле атмосферного давления в тропосфере определяет местоположение и масштабы таких барических образований, как циклоны, с которыми связан ряд неблагоприятных и опасных явлений погоды [1]. На высотах барическое поле представляется в виде поля геопотенциальной высоты основных изобарических поверхностей (далее – геопотенциала). В целях комплексной диагностики барического поля на основе данных аэрологического зондирования проводится объективный анализ поля геопотенциала методами сплайн-аппроксимации [2]. В условиях, когда возможны недостаточность, искажение или отсутствие информации о барическом поле по обширной территории, результирующее диагностируемое поле будет недостоверным. В этом случае при анализе поля геопотенциала необходимо привлекать дополнительные данные, в качестве которых в настоящей статье предлагается использовать данные дистанционного зондирования Земли, поступающие от отечественных космических аппаратов (КА) гидрометеорологического назначения (ГМН).

Основными данными, получаемыми от КА ГМН, являются изображения земной поверхности и облачности, применение которых в качестве дополнительных материалов при анализе поля геопотенциала обеспечивается путем разработки модели, описывающей взаимосвязь полей ветра и облачности в циклоне.

Ранее в моделях, описывающих указанную взаимосвязь, использовали как основу метод трассеров [3]. Суть его заключается в идентификации конкретных облачных образований на последовательных спутниковых изображениях и определении их характеристик, например скорости перемещения под воздействием ветра.

В связи с вышеизложенным актуальной представляется разработка модели, однозначно связывающей поле облачности циклона с полем ветра, которая позволит по одному спутниковому изображению диагностировать поле ветра и определять синоптическую ситуацию при наличии

на данном изображении облачности, связанной с циклоном, что и стало целью настоящей работы.

## СВЯЗЬ ПОЛЯ ОБЛАЧНОСТИ С ПОЛЕМ ВЕТРА В ЦИКЛОНЕ

Как известно, поле облачности, связанной с циклоном, близко по форме к логарифмической спирали, которая описывается следующей формулой в полярных координатах [4]:

$$r = ae^{b\theta}, \quad (1)$$

где  $r$  – полярный радиус точки спирали, м;

$\theta$  – полярный угол отклонения точки спирали от точки пересечения первого витка и полярной оси, рад;

$a$  – параметр, равный полярному радиусу точки пересечения первого витка и полярной оси (отвечает за пространственную ориентацию спирали), м;

$b$  – параметр скрученности спирали (отвечает за густоту витков и направление закрутки).

Данные, полученные от КА ГМН, представляют собой матрицу точек, которой соответствует матрица яркостных температур  $I_{\langle M, N \rangle}$ , где  $M$  – количество строк изображения,  $N$  – количество точек в строке (как правило, равно 2048). Координаты каждой точки в матрице вычисляются по модели SGP4/SDP4 [5] и формулам сферической геометрии на основе эфемерид КА ГМН. Поэтому с учетом вышесказанного возможно провести анализ поля облачности на изображении, принимая во внимание то обстоятельство, что в инфракрасном диапазоне спектра она будет иметь меньшую, по сравнению с подстилающей поверхностью Земли, яркостную температуру. Значит, точки изображения, соответствующие циклонической облачной спирали, будут иметь яркостную температуру меньшую, по сравнению с остальными точками в области циклона. Этот факт позволяет представить данные, поступившие от КА ГМН, в виде множества точек циклонической облачной спирали, для которых известны географические координаты. Выбрав по координатам северную, южную, западную и восточную точки указанного множества, можно приближенно рассчитать координаты центра спирали по полученным в работе формулам:

$$\varphi_0 = k_1 \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2} + b_1, \quad \lambda_0 = \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2}, \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{\lambda_S \varphi_N - \lambda_N \varphi_S}{\lambda_S - \lambda_N}, \quad b_2 = \frac{\lambda_W \varphi_E - \lambda_E \varphi_W}{\lambda_W - \lambda_E}, \quad k_1 = \frac{\varphi_S - \varphi_N}{\lambda_S - \lambda_N}, \quad k_2 = \frac{\varphi_W - \varphi_E}{\lambda_W - \lambda_E}, \quad (3)$$

где  $\varphi_0, \lambda_0$  – широта и долгота центра спирали, град;

$\varphi_N, \lambda_N$  – широта и долгота северной точки множества, град;

$\varphi_S, \lambda_S$  – широта и долгота южной точки множества, град;

$\varphi_W, \lambda_W$  – широта и долгота западной точки множества, град;

$\varphi_E, \lambda_E$  – широта и долгота восточной точки множества, град;

$b_1, b_2$  – промежуточные коэффициенты, град;

$k_1, k_2$  – безразмерные промежуточные коэффициенты.

На основе полученных данных представляется возможным провести аппроксимацию линии циклонической облачной спирали линией логарифмической спирали, используя метод наименьших квадратов (МНК). Пример применения предлагаемого метода представлен на рис. 1. Точками на рисунке отмечены точки циклонической облачной спирали, а линией показана аппроксимирующая логарифмическая спираль.

Аппроксимация сводится к нахождению параметров  $a$  и  $b$  циклонической облачной спирали. Для этого, приняв за полярную ось линию, соединяющую центр спирали  $O(\lambda_0, \varphi_0)$  с ее восточной точкой, и прологарифмировав формулу (1), получим

$$\theta = \frac{1}{b} \ln \frac{r}{a}. \quad (4)$$

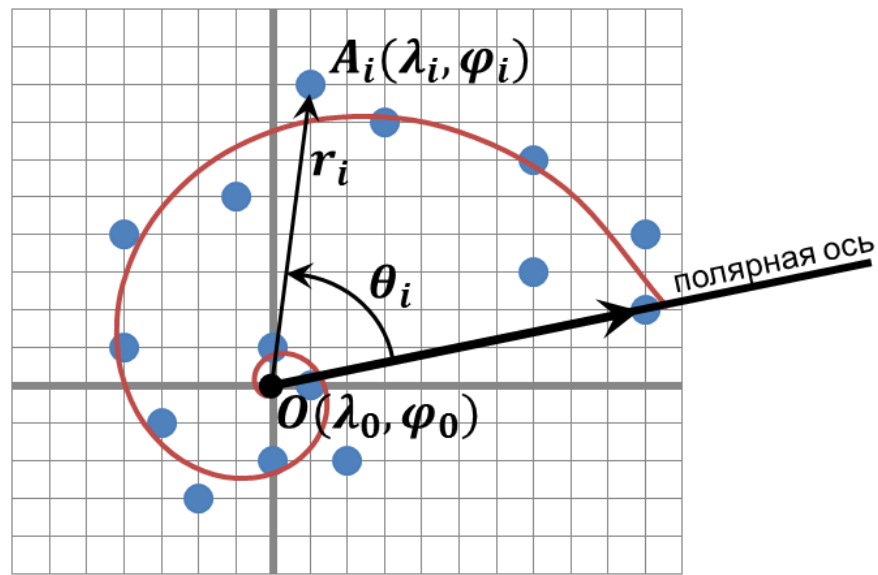


Рис. 1. Применение МНК при аппроксимации линии циклонической облачной спирали

Рассчитав по координатам значения полярных радиусов  $r_i$  и приняв за данные наблюдений значения полярного угла  $\theta_i$  для каждой точки спирали  $A_i(\lambda_i, \varphi_i)$ , получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n \left( \theta_i - \frac{1}{b} \ln \frac{r_i}{a} \right) \frac{\partial \theta}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^n \left( \theta_i - \frac{1}{b} \ln \frac{r_i}{a} \right) \frac{\partial \theta}{\partial b} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $S$  – сумма квадратов невязок значений полярного угла,  $S = S(a, b) = \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta(r_i; a, b))^2$ ;  $n$  – количество точек спирали.

Решением системы уравнений (5) являются выражения, представленные формулами:

$$\begin{cases} b = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln^2 r_i - (\sum_{i=1}^n \ln r_i)^2}{n \sum_{i=1}^n \theta_i \ln r_i - \sum_{i=1}^n \theta_i \sum_{i=1}^n \ln r_i} \\ a = e^{\frac{\sum_{i=1}^n \ln r_i - b \sum_{i=1}^n \theta_i}{n}} \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, параметры  $a$  и  $b$  являются количественными признаками, описывающими поле облачности циклона, и могут быть получены на основе заведомо достоверных данных КА ГМН. Для связи параметров  $a$  и  $b$  с полем ветра предлагается использовать архивные данные о скорости ветра в узлах регулярной сетки на основных изобарических поверхностях.

При последующем анализе поля ветра в циклоне необходимы не только данные о поле ветра, но и координаты некоторых характерных точек циклонической облачной спирали. В циклоне по характерным погодным условиям различают три основные области: фронтальную часть, теплый сектор и тыловую часть. Условно указанные области располагаются в восточной, южной и западной частях циклона соответственно. В некоторых случаях, когда циклон достигает стадии заполнения, фронтальная часть, теплый сектор и тыловая часть располагаются соответственно в северной, восточной и южной областях циклона. Поэтому характерными точками циклонической облачной спирали можно считать северную, южную, западную и восточную, для определения координат которых (на первом витке) в процессе работы получены формулы:

$$\varphi_N = \varphi_0 + ae^{\frac{b\pi}{2}} \cos \arctg|b|, \quad \lambda_N = \lambda_0 + ae^{\frac{b\pi}{2}} \sin \arctg|b|, \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\varphi_S &= \varphi_0 - ae^{\frac{3b\pi}{2}} \cos \operatorname{arctg}|b|, & \lambda_S &= \lambda_0 - ae^{\frac{3b\pi}{2}} \sin \operatorname{arctg}|b|, \\ \varphi_W &= \varphi_0 + ae^{b\pi} \sin \operatorname{arctg}|b|, & \lambda_W &= \lambda_0 - ae^{b\pi} \cos \operatorname{arctg}|b|, \\ \varphi_E &= \varphi_0 + a \cos \operatorname{arctg}|b|, & \lambda_E &= \lambda_0 + a \sin \operatorname{arctg}|b|.\end{aligned}$$

На основе указанных данных возможно провести аппроксимацию функциональной зависимости модуля скорости ветра от параметра скрученности спирали  $b$  полиномами второй степени для каждой из четырех характерных точек циклонической облачной спирали по МНК с помощью предложенной в работе формулы

$$V = a_2 b^2 + a_1 b + a_0, \quad (8)$$

где  $V$  – модуль скорости ветра в одной из выбранных ранее точек циклона, м/с;

$b$  – параметр скрученности циклонической облачной спирали;

$a_2, a_1, a_0$  – коэффициенты полинома второй степени.

Так как в свободной атмосфере реальный ветер близок по направлению к геострофическому и направлен по касательной к изогипсам, а витки циклонической облачной спирали приближенно соответствуют замкнутым изогипсам в области циклона [6], то можно считать, что в северной, южной, западной и восточной точках спирали направление ветра составляет  $90^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $0^\circ$  и  $90^\circ$  соответственно, а в центре спирали ветер равен нулю.

Таким образом, для построения искомой модели необходимо найти коэффициенты  $a_2$ ,  $a_1$  и  $a_0$  для каждой точки, в которой будет определяться модуль скорости ветра  $V$ .

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При разработке модели проведен анализ 147 радиометрически калиброванных и географически привязанных изображений облачности в инфракрасном диапазоне спектра электромагнитного излучения, полученных от КА Метеор-М №2, NOAA 18 и NOAA 19 с помощью автоматического пункта приема спутниковой информации «Сюжет-МБ». На каждом изображении присутствовала облачность одного из 26 циклонов, наблюдавшихся осенью 2015 года в разных стадиях их развития на территории Европы.

Для связи параметров  $a$  и  $b$  с полем ветра использовались архивные данные о скорости ветра в узлах регулярной сетки на изобарических поверхностях 850 и 700 гПа, полученные путем интерполяции данных температурно-ветрового зондирования атмосферы за сроки 00 и 12 часов, которые регулярно циркулируют в системе телесвязи Росгидромета в виде телеграмм в коде FM35. На основе указанных архивных данных определялись значения модуля скорости ветра.

## ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯ ВЕТРА В ЦИКЛОНЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

При разработке модели для каждого из анализируемых изображений были получены координаты множества точек изображенной на снимке циклонической облачной спирали с помощью модели *SGP4/SDP4* и правил сферической геометрии, а координаты центра спирали вычислены по формулам (2) и (3).

Далее, получив решение (6) для каждого из множеств точек циклонической облачности, имеем выборку из 147 значений параметров  $a$  и  $b$  спиралевидной линии облачности циклонов для осеннего периода на территории Европы.

На основе используемых архивных данных о скорости ветра в узлах регулярной сетки для каждой циклонической облачной спирали с определенными параметрами  $a$  и  $b$  получены по четыре выборки значений скорости ветра (для северной, южной, западной и восточной то-

чек) для изобарических поверхностей 850 и 700 гПа (в осенний период). Для каждой из указанных выборок по МНК осуществлялась аппроксимация функциональной зависимости модуля скорости ветра в характерной точке от параметра скрученности  $b$  полиномами второй степени. Вторая степень полиномов выбрана на основе анализа данных выборки, представленных в виде множества точек на графиках, изображенных на рис. 2 и 3.

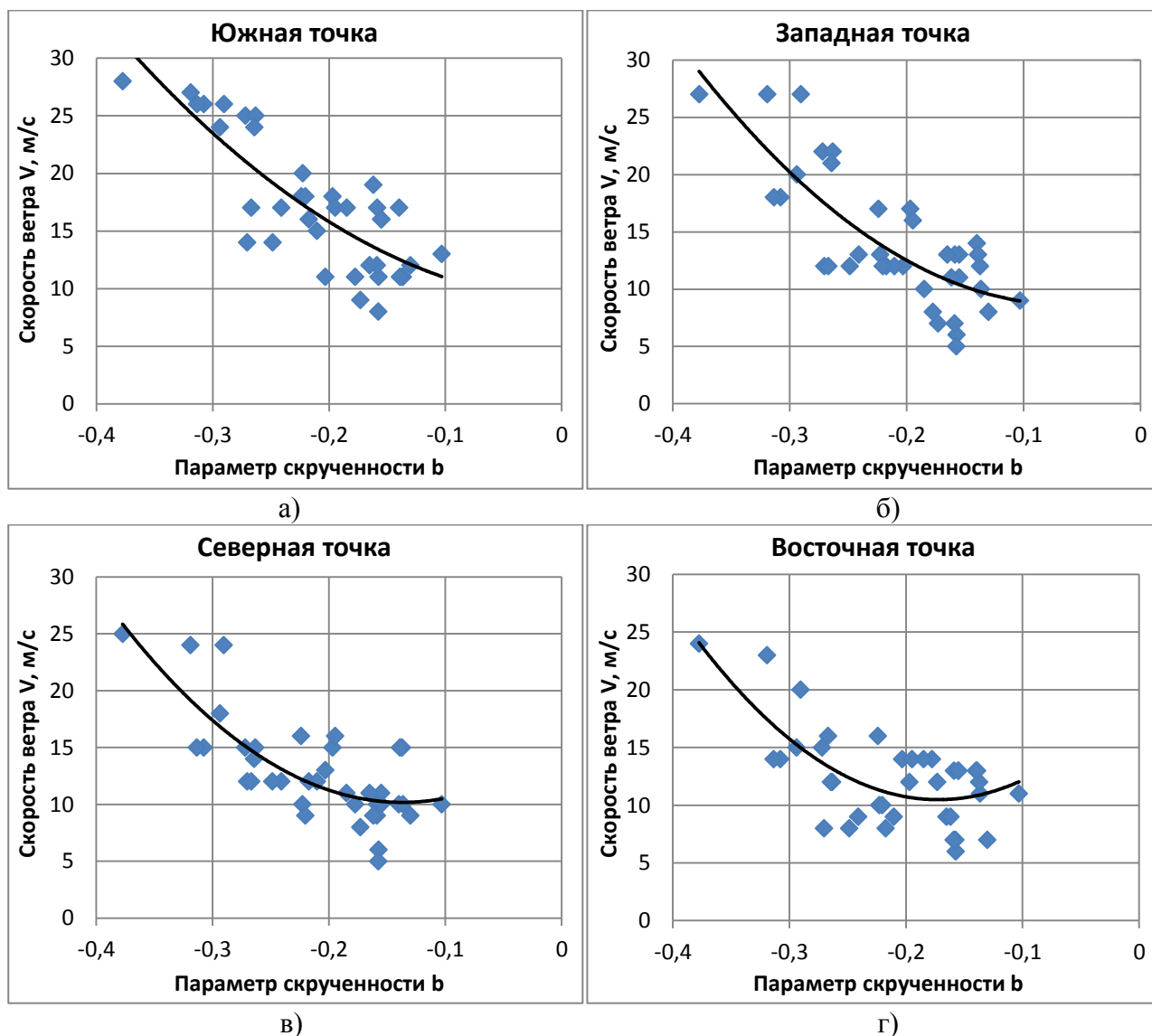
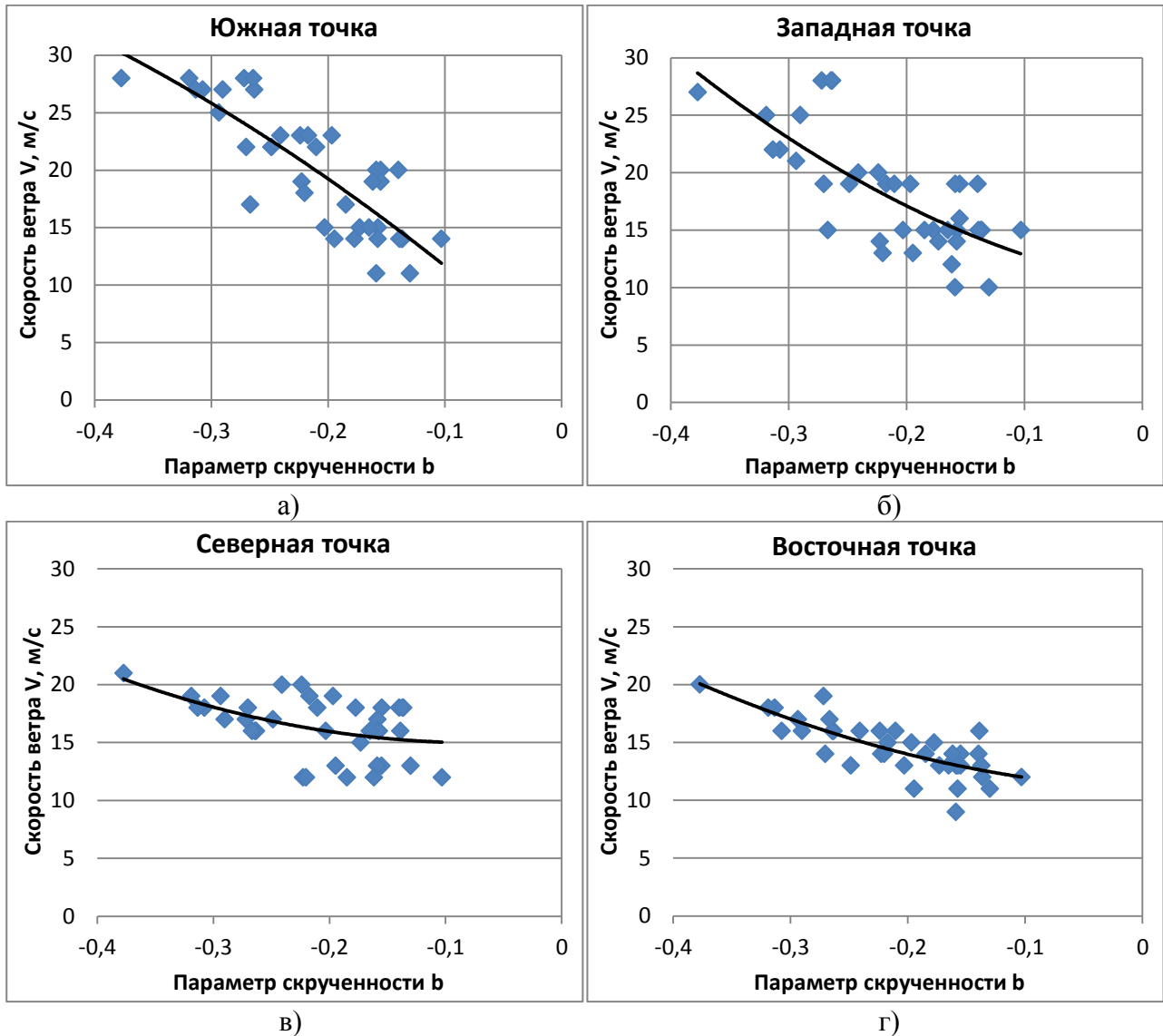


Рис. 2. Графики множества точек выборки скорости ветра для точек облачной спирали (для изобарической поверхности 850 гПа):  
 а – для южной точки облачной спирали; б – для западной точки облачной спирали;  
 в – для северной точки облачной спирали; г – для восточной точки облачной спирали

В данном случае для изобарической поверхности 850 гПа аппроксимантами являются четыре функциональных зависимости модуля скорости ветра от параметра скрученности спирали  $b$  для южной ( $V_{S850}$ ), западной ( $V_{W850}$ ), северной ( $V_{N850}$ ) и восточной ( $V_{E850}$ ) точек, представленные группой формул, полученных в настоящей работе:

$$\begin{aligned}
 V_{S850} &= 141,5b^2 - 6,1245b + 8,9189, \\
 V_{W850} &= 205,82b^2 + 25,833b + 9,454, \\
 V_{N850} &= 271,42b^2 + 74,402b + 15,271, \\
 V_{E850} &= 323,25b^2 + 111,42b + 20,085.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$





Рису. 3. Графики множества точек выборки скорости ветра для точек облачной спирали для изобарической поверхности 700 гПа:

а – для южной точки облачной спирали; б – для западной точки облачной спирали; в – для северной точки облачной спирали; г – для восточной точки облачной спирали

Для изобарической поверхности 700 гПа в работе получены следующие функциональные зависимости модуля скорости ветра от параметра скрученности спирали  $b$  для южной ( $V_{S700}$ ), западной ( $V_{W700}$ ), северной ( $V_{N700}$ ) и восточной ( $V_{E700}$ ) точек:

$$\begin{aligned}
 V_{S700} &= -49,114b^2 - 90,491b + 3,0988, \\
 V_{W700} &= 81,199b^2 - 18,388b + 10,182, \\
 V_{N700} &= 58,572b^2 + 8,263b + 15,267, \\
 V_{E700} &= 50,99b^2 - 4,8758b + 10,97.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Параметр  $a$  необходим при расчете координат характерных точек по формулам (7).

Представленные формулами (9) и (10) физико-статистические зависимости модуля скорости ветра от параметра скрученности облачной спирали являются искомой моделью, описывающей взаимосвязь полей ветра и облачности в циклоне.

Характеристики точности и надежности МНК-оценок коэффициентов разработанной физико-статистической модели поля ветра в циклоне, а также средние квадратические отклоне-



ния получаемых с ее помощью значений скорости ветра приведены в табл. 1. Половина ширины доверительного интервала  $\varepsilon$  значений оценок коэффициентов  $a_2$ ,  $a_1$ ,  $a_0$  представлена для доверительной вероятности 0,95.

Таблица 1

**Характеристики точности и надежности физико-статистической модели ветра  
в циклоне**

Парам.	Южная точка		Западная точка		Северная точка		Восточная точка	
	Оценка	$\varepsilon$	Оценка	$\varepsilon$	Оценка	$\varepsilon$	Оценка	$\varepsilon$
850 гПа								
$a_0$	8,9189	7,823	9,454	8,394	15,271	6,891	20,085	7,179
$a_1$	-6,1245	72,109	25,833	77,372	74,402	63,519	111,42	66,173
$a_2$	141,5	156,21	205,82	167,612	271,42	137,602	323,25	143,351
СКО $V$	3,42	-	3,67	-	3,01	-	3,14	-
700 гПа								
$a_0$	3,0988	7,295	10,182	8,022	15,267	5,466	10,97	3,551
$a_1$	-90,491	67,237	-18,388	73,943	8,263	50,382	4,8758	32,734
$a_2$	-49,114	145,657	81,199	160,182	58,572	109,143	50,99	70,913
СКО $V$	3,19	-	3,51	-	2,39	-	1,55	-

Как видно из данных табл. 1, среднее квадратическое отклонение значений модуля скорости ветра (ошибка модели) изменяется от 1,55 до 3,67 м/с. В соответствии с руководством Всемирной метеорологической организации по производству метеорологических наблюдений, допустимая ошибка определения скорости ветра на высотах составляет 5 м/с [7]. Таким образом, разработанную физико-статистическую модель поля ветра в циклоне на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса можно считать адекватной и использовать ее в оперативной практике гидрометеорологических подразделений в осенний период на территории Европы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе архивных данных, получаемых с помощью КА ГМН, и архивных данных о поле ветра, применив описанный в статье математический аппарат, можно получить функциональные зависимости, аналогичные формулам (9) и (10), для других периодов года. Эти зависимости используются при расчете значений модуля скорости ветра в характерных точках циклона (северной, южной, западной и восточной), направление ветра в которых приближенно составляет  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$  (в центре циклона скорость ветра равна нулю). Таким образом, в указанных точках представляется возможным рассчитать зональную и меридиональную составляющие скорости ветра  $u$  и  $v$ . Далее на основе полученных значений рекомендуется произвести интерполяцию поля ветра в области циклона методом сплайн-аппроксимации [2].

Поле геопотенциала связано с полем ветра в модели геострофического ветра, представленной формулами [8]:

$$u_g = -\frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial y}; \quad v_g = \frac{g}{l} \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (11)$$

где  $u_g, v_g$  – зональная и меридиональная составляющие вектора скорости ветра, м/с;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $l$  – параметр Кориолиса, с<sup>-1</sup>;  
 $\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}$  – производные геопотенциала по направлениям.

Таким образом, с помощью формул (11) и зональных и меридиональных составляющих скорости ветра, полученных на основе предлагаемой модели, в узлах регулярной сетки могут быть рассчитаны производные геопотенциала по направлениям  $\frac{\partial H}{\partial x}$  и  $\frac{\partial H}{\partial y}$ , которые используются при объективном анализе поля геопотенциала методом сплайн-аппроксимации. Значения геопотенциала в области циклона, полученные от недостоверных источников, необходимо исключить из объективного анализа. Рассчитанное поле геопотенциала можно считать достоверным и использовать при составлении прогнозов гидрометеорологических условий в случае недостаточности или отсутствия информации о барическом поле по обширной территории, например: над акваториями океанов, арктическими территориями, пустынями или другими территориями, не освещенными гидрометеорологическими наблюдениями.

### Список используемых источников

1. Наставление по метеорологической службе авиации Вооруженных Сил Российской Федерации (НАМС-2014). – М.: Воениздат, 2014. – 80 с.
2. Вагер Б.Г., Серков Н.К. Сплайны при решении прикладных задач метеорологии и гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 160 с.
3. Иванец М.О., Готюр И.А. Методика диагностирования поля ветра по данным метеорологических космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2009. – Вып. 623. – С.208–214.
4. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
5. Hoofs F.R., Roehrich R.L. Spacetrack Report no. 3. Models for Propagation of NORAD Element Sets. – Peterson: Aerospace Defense Center, 1980. – 90 p.
6. Методы восстановления синоптического положения и условий погоды: метод. пособие. – М.: Военное изд-во, 1983. – 128 с.
7. Руководство по Глобальной системе наблюдений. ВМО-№ 488. – Женева: ВМО, 2007. – URL: [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_488\\_ru.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_488_ru.pdf) (дата обращения: 14.03.2017).
8. Динамика атмосферы: учебник / В.В. Клемин, Ю.В. Кулешов, С.С. Суворов, Ю.Н. Волконский. – СПб.: Наука, 2013. – 421 с.

В.Ю. Лупанчук,  
кандидат техн. наук  
Военная академия РВСН имени Петра Великого

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НАВИГАЦИОННОЙ КАРТОГРАФИИ В ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКУЩЕГО ПОЛОЖЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ОКРУЖАЮЩЕМ ПРОСТРАНСТВЕ**

В статье рассматривается развитие методов навигационной картографии на основе создания высокоточной локальной области земной поверхности с навигационно-геодезическими параметрами для решения задач позиционирования мобильных робототехнических комплексов в окружающем пространстве. Локальные области могут быть представлены в виде высокоточной геопространственной информации эталонных моделей на основе применения картографических данных и инструментальных измерений в специальных точках выбранного участка местности.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, локальная область земной поверхности, картографические данные, инструментальные данные, корреляция, эталонная модель.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных видов обеспечения эффективного развития экономики, укрепления обороны и безопасности страны является навигационное, топографо-геодезическое и картографическое обеспечение, которое представляет собой совокупность управленческих, производственных, научных и образовательных мероприятий по созданию, хранению и доведению до потребителей государственных навигационно-геодезических данных и государственных топографических карт на территорию Российской Федерации и зоны ее экономических интересов, континентального шельфа, территорий иностранных государств, Мирового океана, Антарктиды.

Выделены наиболее важные направления в сфере развития науки и технологий в областях навигации, геодезии и картографии на период до 2030 года [1]:

1. Поддержание и развитие высокоточной опорной земной системы координат на базе комплексного применения взаимодополняющих измерительных средств (глобальная навигационная спутниковая система, лазерная локация искусственных спутников Земли и др.), находящихся в ведении различных федеральных органов исполнительной власти и научных организаций.

2. Поддержание и развитие высокоточных государственных спутниковых геодезических сетей, а также создание системы обеспечения потребителей точными данными об орбитах космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем для решения фундаментальных и прикладных задач геодезии и геодинамики.

3. Создание современной системы высотного и гравиметрического обеспечения всей территории Российской Федерации, а также поддержание и развитие службы контроля деформации земной поверхности в рамках федеральной системы сейсмологических наблюдений.

4. Совершенствование средств, методов получения и тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли, а также лазерного сканирования земной поверхности.

5. Унификация, развитие и поддержание в современном состоянии банков геодезических и картографических данных, а также создание и развитие отечественных геоинформационных систем нового поколения, соответствующих мировому уровню развития геоинформационных технологий.

Совершенствование и развитие выделенных направлений позволит эффективно использовать навигационно-геодезическое обеспечение для решения множества научно-теоретических задач по укреплению обороны и безопасности страны, включая развитие методов навигационной картографии на требуемом научном уровне. *Навигационная картография* – это раздел картографии, изучающий теоретические и методические вопросы создания карт и приемы работы с ними, используемые для решения различных навигационных задач [2]. Основной целью навигационной картографии является обеспечение высокоточной достоверной картографической и мультимедийной информацией в процессе передвижения объекта в окружающем пространстве.

К задачам навигационной картографии относятся:

- разработка классификации навигационных карт;
- описание математической основы (проекции, системы координат, масштаб) навигационных карт;
- строгое определение содержания цифровой навигационной продукции в соответствии с необходимым масштабом и др.

Наряду с развитием навигационно-геодезической, картографической и топографической отрасли повсеместно начало развиваться направление, которое можно охарактеризовать как робототехническое. За последние годы проводится большое количество научных работ и изысканий в области робототехники. Особенно важно отметить применение роботов в критических ситуациях, которые связаны с явной угрозой человеческой жизни. Робототехнические комплексы (РТК) в зависимости от области и способа применения имеют довольно широкую классификацию.

На сегодняшний день одной из наиболее важных проблем всех существующих РТК, перемещающихся самостоятельно – без управления со стороны человека, остается проблема позиционирования (навигация) в окружающем пространстве при совершении различных видов движений (поступательное или вращательное). Для успешной навигации в пространстве бортовая система любого мобильного РТК должна уметь строить маршрут, управлять параметрами движения (задавать угол поворота и скорость), правильно интерпретировать сведения об окружающем мире, получаемые от датчиков, и постоянно отслеживать собственное местоположение [3]. Основными задачами применения РТК в интересах развития навигационно-геодезического, картографического и топографического обеспечения являются высокоточное определение параметров текущего положения мобильного робота на основе применения корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС) и выполнение различного рода задач по защищенной передаче навигационно-геодезических данных для последующей их обработки различными видами потребителей.

Функционирование КЭНС мобильного РТК может быть основано на применении эталонных моделей в процессе движения в окружающем пространстве, которые могут быть представлены в виде маркеров высокоточных локальных областей поверхности Земли. Локальную область можно получить путем совместной обработки картографических данных и инструментальных измерений в специальных точках выбранного участка местности.

В данной работе рассматривается возможность создания высокоточной локальной области на карте для последующего использования ее в виде маркера при движении мобильного РТК.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Дано:** 1. Топографическая карта на выбранный участок местности, по которой определяются значения координат и абсолютной высоты в произвольных и «базовых» точках<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> «Базовая» точка – это точка, в которой имеется два вида информации – картографическая и инструментальная.

2. Выбираются произвольные точки на карте, которые позволяют оценить эффект от совместного применения картографических данных и инструментальных измерений с различными видами погрешностей.

$U_{\text{ПТ}n}^{\text{К}}$  –  $n$ -произвольные точки, в которых необходимо найти значения координат и высоты. В указанных точках определены следующие параметры:  $(X, Y)_{\text{ПТ}1}^{\text{К}}, \dots, (X, Y)_{\text{ПТ}n}^{\text{К}}$ ,  $H_{\text{ПТ}1}^{\text{К}}, \dots, H_{\text{ПТ}n}^{\text{К}}$  – значения прямоугольных координат и абсолютных высот в произвольных точках по карте, определенных с погрешностями:

$$\left. \begin{array}{l} (X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{К}} = (X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{И}} + \delta(X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{К}} \\ \dots \\ (X, Y)_{\text{ПТ}n}^{\text{К}} = (X, Y)_{\text{ПТ}n}^{\text{И}} + \delta(X, Y)_{\text{ПТ}n}^{\text{К}} \end{array} \right\}, \quad \left. \begin{array}{l} H_{\text{ПТ}}^{\text{К}} = H_{\text{ПТ}}^{\text{И}} + \delta H_{\text{ПТ}}^{\text{К}} \\ \dots \\ H_{\text{ПТ}n}^{\text{К}} = H_{\text{ПТ}n}^{\text{И}} + \delta H_{\text{ПТ}n}^{\text{К}} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $(X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{И}}$  – истинные значения координат без погрешностей;  
 $\delta(X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{К}}, \delta H_{\text{ПТ}}^{\text{К}}$  – погрешности определения координат и высот по картографическим данным;

3. Выбираются «базовые» точки, которые характеризуются наличием разнородной информации в одной точке.

$U_1^{\text{К}}, \dots, U_i^{\text{К}}$  – «базовые» точки, которые выбираются по картам с погрешностями, как показано в выражении (1), и в этих же точках имеется инструментальная информация. Инструментальные измерения также представлены погрешностями их определения:

$$\left. \begin{array}{l} (X, Y)_1^{\text{ИЗ}} = (X, Y)_1^{\text{И}} + \delta(X, Y)_1^{\text{ИЗ}} \\ \dots \\ (X, Y)_i^{\text{ИЗ}} = (X, Y)_i^{\text{И}} + \delta(X, Y)_i^{\text{ИЗ}} \end{array} \right\}, \quad \left. \begin{array}{l} H_1^{\text{ИЗ}} = H_1^{\text{И}} + \delta H_1^{\text{ИЗ}} \\ \dots \\ H_i^{\text{ИЗ}} = H_i^{\text{И}} + \delta H_i^{\text{ИЗ}} \end{array} \right\}. \quad (2)$$

4. Ограничения для исходных данных:

–  $\sigma_{\text{ПТ}}^{\text{К}}((X, Y), H) = \sigma_1^{\text{К}}((X, Y), H) = \dots = \sigma_i^{\text{К}}((X, Y), H)$  – средняя квадратическая погрешность (СКП) определения координат и высот по топографической карте;

–  $\sigma_1^{\text{ИЗ}}((X, Y), H) = \dots = \sigma_i^{\text{ИЗ}}((X, Y), H)$  – СКП инструментальных измерений координат и высот с помощью геодезических средств общего назначения.

В связи с наличием избыточности навигационной информации в «базовых» точках имеется принципиальная возможность применить методы совместного неравноточного уравнивания и получить оптимальные оценки погрешностей навигационно-геодезических параметров, что позволит уточнить значения координат и высот в локальной области карты.

5. Вводится корреляционная функция для координат  $P_{(X, Y)}$  и высот  $P_H$  как мера статистической связи между погрешностями картографических параметров. Ее значение может быть найдено из корреляционных функций (3) погрешностей картографических данных. Вид корреляционных функций зависит от расстояния между выбранными точками, тогда

$$k_{\delta(X, Y)j}(r_{\Delta j}) = D_{\delta(X, Y)}^{\text{К}} \exp\left(-\frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\delta(X, Y)}}\right) \left(1 + \frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\delta(X, Y)}}\right), \quad (3)$$

$$k_{\delta H j}(r_{\Delta j}) = D_{\delta H}^{\text{К}} \exp\left(-\frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\delta H}}\right) \left(1 + \frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\delta H}}\right),$$

где  $D_{\delta(X, Y)}^{\text{К}}, D_{\delta H}^{\text{К}}$  – дисперсии ошибок картографических данных;

- $\tau_{\delta(X,Y)}, \tau_{\delta H}$  – радиус корреляции погрешностей карт;  
 $r_{\Delta j}$  – расстояние между произвольной и «базовыми» точками, выбранными по картографическим данным  $r_{\Delta j} = \sqrt{(X_i - X_{\text{ПТ}})^2 + (Y_i - Y_{\text{ПТ}})^2}$

6. Требуется получить оптимальные оценки погрешностей координат и высоты, а также рассчитать СКП определения значений координат и высот по карте после совместного уравнивания картографических данных и инструментальных измерений. Выбран критерий оптимальности, который представлен ниже:

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n k_{(X,Y)_i} \cdot ((X,Y)_i^K - (X,Y)_i^B)^2 + k_{H_i} \cdot (H_i^K - H_i^B)^2 = \min. \quad (4)$$

Рассмотрим существо формирования высокоточных локальных областей выбранного участка местности (рис.1).

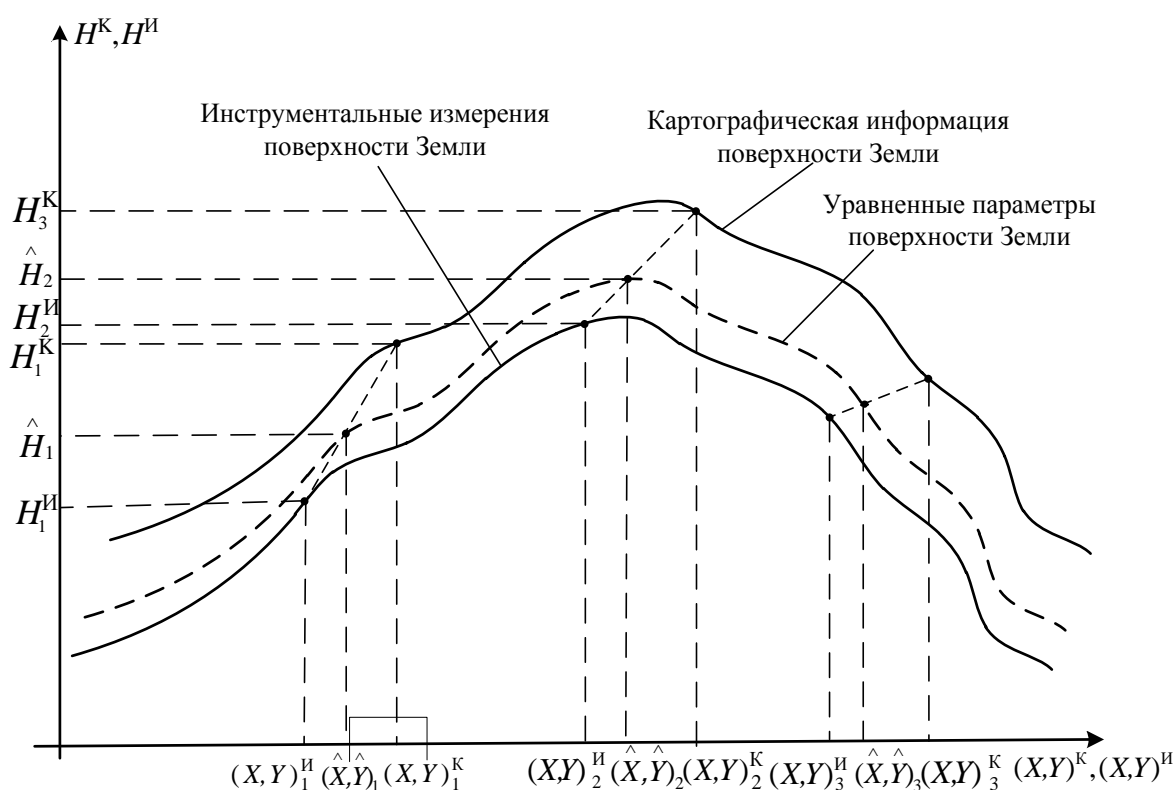


Рис.1. Представление поверхности Земли в виде картографических и инструментальных данных

На рисунке представлены картографические данные с погрешностями определения необходимых навигационно-геодезических параметров в «базовых» точках. Также представлены инструментальные измерения в виде множества точек, значения которых являются заведомо более точными, чем значения картографических данных. Показана уравненная поверхность, которая может быть получена путем совместной обработки с учетом весовых коэффициентов картографических и инструментальных данных.

В связи с тем, что инструментальные измерения в выбранных точках заведомо точные, уравненная поверхность будет находиться наиболее близко к поверхности, которая получена инструментально. Выбраны три «базовые» точки с прямоугольными координатами и абсолютной высотой (рис. 2).

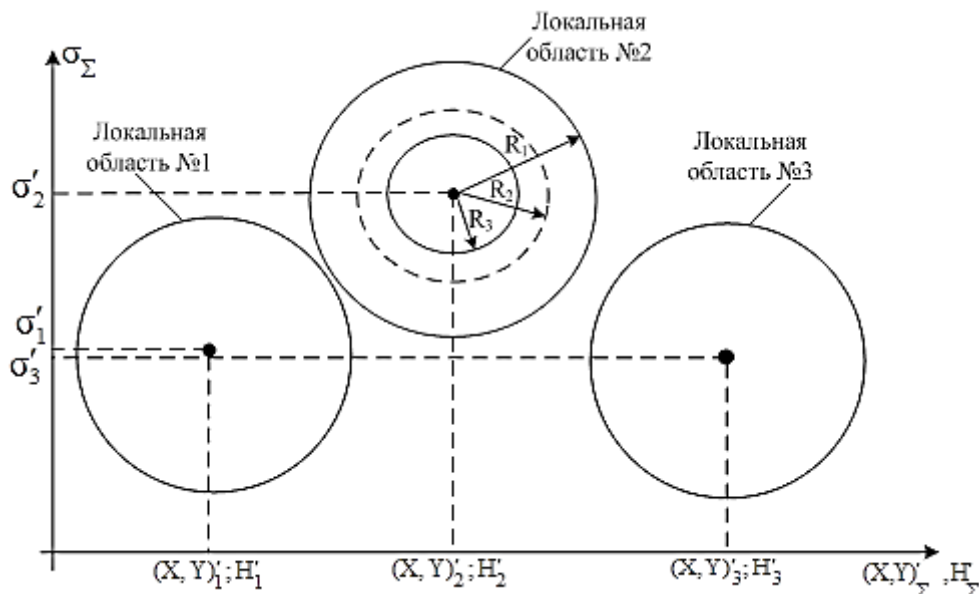


Рис. 2. Локальные области с центрами в «базовых» точках

После совместного уравнивания картографической и инструментальной информации на карте образуются высокоточные локальные области вокруг «базовых» точек, которые позволяют уточнить значения параметров координат и высоты  $(X, Y)'_2, H'_2$  в точке 2 со средним квадратическим отклонением, равным нулю  $\sigma'_2 = \sigma^{ИЗ}$ , что представлено в локальной области № 2.

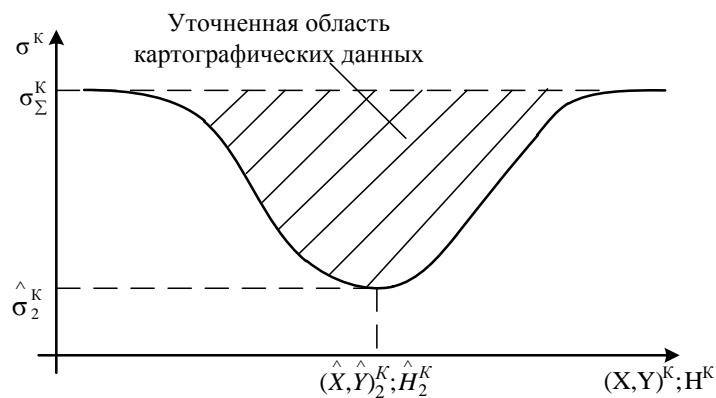


Рис. 3. Область уменьшения погрешностей в локальной области № 2

Остальные локальные области формируются по тому же принципу. Области представлены различными радиусами (уровнями) действия погрешностей:

- погрешности картографических данных представлены значением  $R_1$ , которые характеризуются СКП определения прямоугольных координат и высоты по топографической карте;
- погрешности урванных значений координат и высоты от картографических и инструментальных данных представлены значением  $R_2$ , они характеризуются значениями СКП совместного уравнивания параметров;
- погрешности инструментальных измерений в «базовой» точке представлены значением  $R_3$ .

Общий уровень погрешностей карты в локальной области будет изменчивым (рис. 3). В итоге после окончания действия корреляционной связи между погрешностями картографи-

ческой информации, которая обуславливается радиусом корреляции, эффект будет стремиться к общему уровню СКП картографических данных.

Неравноточное уравнивание измерений позволяет:

– повысить точность определения координат и высоты в локальных областях имеющейся карты, а также уменьшить погрешность картографических данных в области действия инструментальных точек;

– образовать отдельную локальную область, которая может быть представлена в виде высокоточного эталонного маркера при позиционировании РТК в окружающем пространстве.

## МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РТК В ПРОСТРАНСТВЕ

Рассмотрим основные этапы уравнивания картографических данных и инструментальных измерений с помощью байесовского подхода по формулам условной апостериорной плотности распределения случайной величины [4].

1. Построение общего вектора погрешностей навигационных параметров в произвольной и «базовых» точках, определенных по картографическим данным:

$$Z_{(x,y)} = \begin{pmatrix} \delta(X,Y)_{\text{ПТ}} \\ \delta(X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{К}} \\ \delta(X,Y)_{\text{Б2}}^{\text{К}} \\ \delta(X,Y)_{\text{Б3}}^{\text{К}} \end{pmatrix}, \quad Z_H = \begin{pmatrix} \delta H_{\text{ПТ}} \\ \delta H_{\text{Б1}}^{\text{К}} \\ \delta H_{\text{Б2}}^{\text{К}} \\ \delta H_{\text{Б3}}^{\text{К}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $Z_{(x,y)}$  – вектор погрешностей прямоугольных координат в произвольной и «базовых» точках;

$Z_H$  – вектор погрешностей высоты над уровнем моря в произвольной и «базовых» точках.

2. Формирование априорной ковариационной матрицы погрешностей навигационных параметров, определенных по картографическим материалам с учетом корреляционной зависимости между погрешностями карты. Главная диагональ ковариационной матрицы представлена дисперсиями картографической информации всех точек, взятых в обработку  $D_H^{\text{К}}$ ,  $D_{(x,y)}^{\text{К}}$ :

$$P_{X,Y}^{\text{АПР}} = \begin{pmatrix} (\sigma_{\text{ПТХ,Y}}^{\text{К}})^2 & k(r_{\Delta 1}) & k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 3}) \\ k(r_{\Delta 1}) & (\sigma_{\text{Б1 X,Y}}^{\text{К}})^2 & k(r_{\Delta 4}) & k(r_{\Delta 5}) \\ k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 4}) & (\sigma_{\text{Б2 X,Y}}^{\text{К}})^2 & k(r_{\Delta 6}) \\ k(r_{\Delta 3}) & k(r_{\Delta 5}) & k(r_{\Delta 6}) & (\sigma_{\text{Б3 X,Y}}^{\text{К}})^2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$P_H^{\text{АПР}} = \begin{pmatrix} (\sigma_{\text{ПТ H}}^{\text{К}})^2 & k(r_{\Delta 1}) & k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 3}) \\ k(r_{\Delta 1}) & (\sigma_{\text{Б1 H}}^{\text{К}})^2 & k(r_{\Delta 4}) & k(r_{\Delta 5}) \\ k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 4}) & (\sigma_{\text{Б2 H}}^{\text{К}})^2 & k(r_{\Delta 6}) \\ k(r_{\Delta 3}) & k(r_{\Delta 5}) & k(r_{\Delta 6}) & (\sigma_{\text{Б3 H}}^{\text{К}})^2 \end{pmatrix},$$

где  $k(r_{\Delta 1-6})$  – корреляционная функция между погрешностями карты в «базовых» точках.

3. Запись выражений, устанавливающих связь между значениями навигационно-геодезических параметров и их погрешностями в «базовых» точках:

$$1) (X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{К}} = (X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{И}} + \delta(X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{К}}, \quad (X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{И3}} = (X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{И}} + \delta(X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{И3}}; \quad (7)$$



$$(X, Y)_{B2}^K = (X, Y)_{B2}^I + \delta(X, Y)_{B2}^K, (X, Y)_{B2}^{I3} = (X, Y)_{B2}^I + \delta(X, Y)_{B2}^{I3};$$

$$(X, Y)_{B3}^K = (X, Y)_{B3}^I + \delta(X, Y)_{B3}^K, (X, Y)_{B3}^{I3} = (X, Y)_{B3}^I + \delta(X, Y)_{B3}^{I3};$$

$$2) H_{B1}^K = H_{B1}^I + \delta H_{B1}^K, H_{B1}^{I3} = H_{B1}^I + \delta H_{B1}^{I3};$$

$$H_{B2}^K = H_{B2}^I + \delta H_{B2}^K, H_{B2}^{I3} = H_{B2}^I + \delta H_{B2}^{I3};$$

$$H_{B3}^K = H_{B3}^I + \delta H_{B3}^K, H_{B3}^{I3} = H_{B3}^I + \delta H_{B3}^{I3}.$$

Выражения, полученные по картографическим данным вычитаются из выражений, полученных инструментально:

$$1) (X, Y)_{B1}^{I3} - (X, Y)_{B1}^K = \delta(X, Y)_{B1}^{I3} - \delta(X, Y)_{B1}^K, (X, Y)_{B2}^{I3} - (X, Y)_{B2}^K = \delta(X, Y)_{B2}^{I3} - \delta(X, Y)_{B2}^K,$$

$$(X, Y)_{B3}^{I3} - (X, Y)_{B3}^K = \delta(X, Y)_{B3}^{I3} - \delta(X, Y)_{B3}^K; \quad (8)$$

$$2) H_{B1}^{I3} - H_{B1}^K = \delta H_{B1}^{I3} - \delta H_{B1}^K, H_{B2}^{I3} - H_{B2}^K = \delta H_{B2}^{I3} - \delta H_{B2}^K, H_{B3}^{I3} - H_{B3}^K = \delta H_{B3}^{I3} - \delta H_{B3}^K.$$

4. Представление выражений разностных измерений в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} (X, Y)_{B1}^{I3} - (X, Y)_{B1}^K \\ (X, Y)_{B2}^{I3} - (X, Y)_{B2}^K \\ (X, Y)_{B3}^{I3} - (X, Y)_{B3}^K \end{bmatrix} = M \cdot Z_{(X, Y)}, \quad \begin{bmatrix} H_{B1}^{I3} - H_{B1}^K \\ H_{B2}^{I3} - H_{B2}^K \\ H_{B3}^{I3} - H_{B3}^K \end{bmatrix} = M \cdot Z_H, \quad (9)$$

где  $M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  – матрица наблюдения СКП навигационных параметров в локальной области карты.

5. Формирование ковариационной матрицы погрешностей инструментальных измерений навигационных параметров в «базовых» точках:

$$R_{X, Y} = \begin{pmatrix} (\sigma_{B1 X, Y}^{I3})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_{B2 X, Y}^{I3})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_{B3 X, Y}^{I3})^2 \end{pmatrix}, \quad R_H = \begin{pmatrix} (\sigma_{B1 H}^{I3})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_{B2 H}^{I3})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_{B3 H}^{I3})^2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

6. Формирование коэффициентов усиления для нахождения оптимальных оценок навигационных параметров:

$$K_{X, Y} = P_{X, Y} \cdot M^T \cdot (M \cdot P_{X, Y} \cdot M^T + R_{X, Y})^{-1}, \quad K_H = P_H \cdot M^T \cdot (M \cdot P_H \cdot M^T + R_H)^{-1}. \quad (11)$$

7. Расчет оптимальных оценок параметров в произвольной точке локальной области карты:

$$\begin{pmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \end{pmatrix}_{ПТ} = K_{X, Y} \cdot \begin{pmatrix} \delta X, Y_{B1} \\ \delta X, Y_{B2} \\ \delta X, Y_{B3} \end{pmatrix}, \quad \hat{X}, \hat{Y}_{ПТ}^K = (X, Y)_{ПТ}^I + (\delta X, Y_{ПТ}^K - \delta \hat{X}, \hat{Y}_{ПТ}^K),$$

$$\hat{H}_{ПТ} = K_H \cdot \begin{pmatrix} \delta H_{B1} \\ \delta H_{B2} \\ \delta H_{B3} \end{pmatrix}, \quad \hat{H}_{ПТ}^K = H_{ПТ}^I + (\delta H_{ПТ}^K - \delta \hat{H}_{ПТ}^K). \quad (12)$$

После этапа нахождения оптимальных оценок погрешностей навигационно-геодезических параметров необходимо рассчитать апостериорную матрицу погрешностей для произвольной точки локальной области карты.

8. Расчет апостериорной матрицы погрешностей соответственно имеет вид

$$P_{X, Y}^{АПС} = P_{X, Y}^{АПР} - K_i \cdot M \cdot P_{X, Y}^{АПР}, \quad P_H^{АПС} = P_H^{АПР} - K_i \cdot M \cdot P_H^{АПР}. \quad (13)$$

Методика позволяет получить оптимальные оценки погрешностей навигационных параметров (координат и высоты) с уточненными погрешностями в локальной области карты. Необходимо отметить, что такой же подход может применяться для различных видов гравиметрических карт [5].

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РТК В ПРОСТРАНСТВЕ**

Сопоставление новых технических решений с известными обычно проводят на основе оценки эффективности. При этом в оценках (показателях) эффективности учитывают не только эффект, но и затраты, предполагающие его достижение. Особенностью решаемой задачи является то, что затраты могут быть связаны лишь с иной организацией обработки измерительной информации, так как высокоточные инструментальные измерения могут быть компонентами (точками) в составе государственной геодезической сети.

Известно, что затраты на применения нового способа математической обработки результатов измерений существенно ниже затрат на проведение новых инструментальных определений геодезических данных в каждой точке локальной области с необходимым шагом интерполяции. В связи с этим целесообразна оценка абсолютных показателей эффекта от применения методики формирования высокоточных локальных областей. Эффект рассматривается на примере формирования высокоточной локальной области абсолютной высоты от шести базовых точек.

Целью численной оценки является подтверждение положительного эффекта от применения методики. Для оценки эффекта используются показатели СКП оценки погрешностей абсолютной высоты (показатель качества) в локальной области и изменения структуры карты после совместного уравнивания измерений.

Выбор исходных данных производился по цифровой карте местности. В среднеравнинном районе выбрано шесть «базовых» точек, которые характеризуются прямоугольными координатами:  $X_1^K Y_1^K, \dots, X_i^K Y_i^K$  ( $i=1\div 6$ ).

Выбор точек (объектов) неоднороден, одни характеризуются как перекрестки дорог, другие являются объектами местности (мост через реку). Необходимо отметить, что выбор «базовых» объектов, которые будут в дальнейшем участвовать в виде маркеров локальной области для позиционирования РТК в окружающем пространстве, является важным вопросом при формировании алгоритмов обработки навигационной информации в КЭНС.

Средний радиус корреляции погрешностей высот над уровнем моря, определенных по картографическим данным, установлен как  $r_K = 2000$  м [6].

На рис. 4 изображены СКП определения высот в пределах рассматриваемого участка местности с дополнительной инструментальной информацией в «базовых» точках. Из рисунка видно, что «базовые» точки характеризуются СКП инструментальных измерений, точность которых выше картографических. Образовалась локальная область изменения высот на карте, причем ближе к «базовым» точкам значения высот определены точнее.

Средний уровень СКП высот после применения методики по всей площади рассматриваемого участка местности составил  $\sigma_H \approx 8$  м, при суммарной погрешности карты в 9 м. В «базовых» точках точность картографической информации после уравнивания достигает значений 5-6 м.

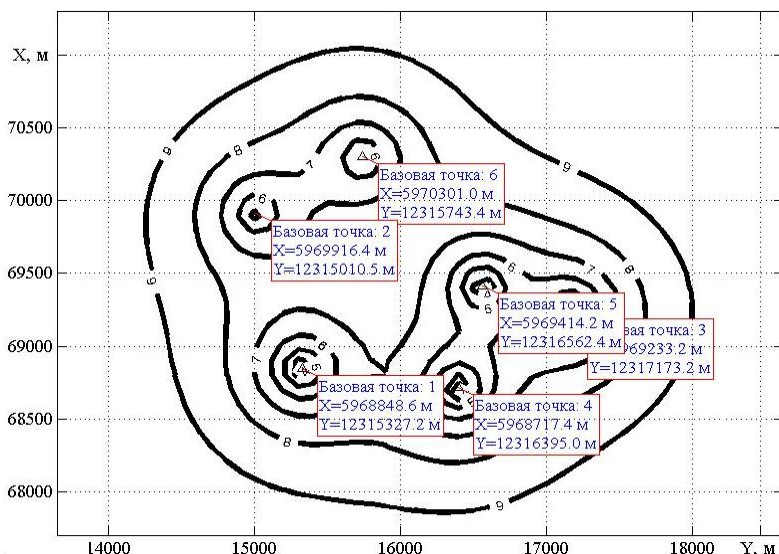


Рис. 4. Погрешности определения высот в локальной области карты

Методика формирования высокоточных локальных областей для позиционирования РТК в окружающем пространстве позволяет изменять структуру локальной области карты, а также получать наиболее достоверные значения высот в этих областях (рис. 5).

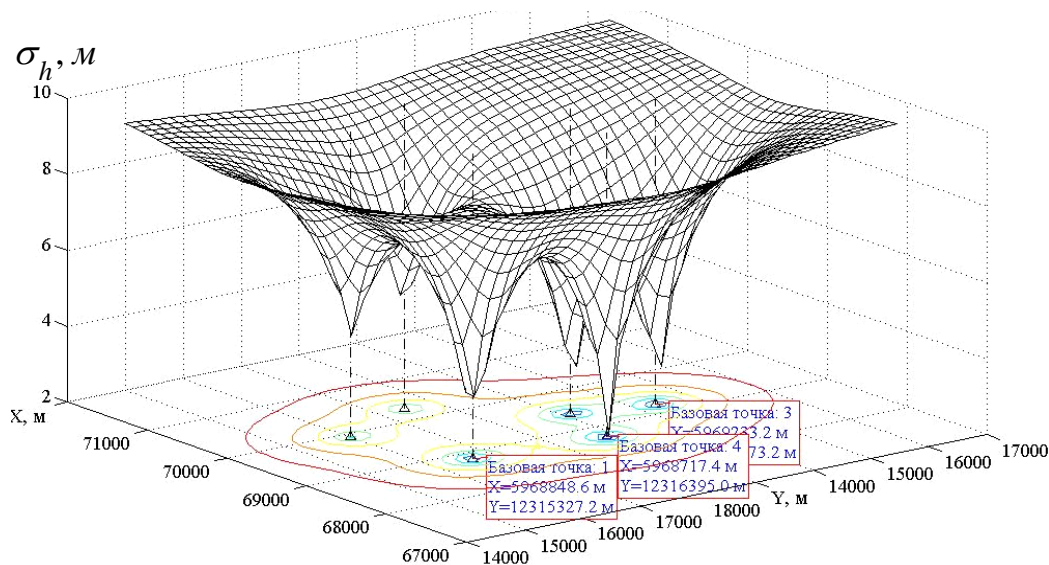


Рис. 5. Локальная область карты

Далее, рассмотрены результаты применения методики для локальных областей картографических данных при определении абсолютных высот. Научно-методический аппарат неравноточного уравнивания навигационно-геодезических измерений, который применен в методике, отличается от имеющихся наличием корреляционных связей между погрешностями картографической информации и позволяет повысить точность определения высот по всей площади локальной области карты на 1 м, а в точках с инструментальной информацией – до 3 м при общей погрешности карты 9 м и соответственно инструментальной погрешности в «базовых» точках 3–5 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен научно-методический аппарат совместной обработки картографической и инструментальной информации, с учетом корреляционных связей между погрешностями карты. Данная методика позволяет формировать высокоточные локальные области для позиционирования РТК в окружающем пространстве. Результаты исследования могут найти применение в различных областях научно-технической деятельности, например:

– высокоточное позиционирование мобильных РТК (БЛА, наземных РТК и др.) в окружающем пространстве с последующим совместным применением при решении задач определения местоположения различных объектов на поверхности Земли в отсутствие сигналов спутниковой навигационной системы;

– решение задач поддержания и развития службы контроля деформации земной поверхности в рамках федеральной системы сейсмологических наблюдений, особенно в высокогорных районах страны;

– подготовка высокоточной геопространственной информации в виде геоинформационных систем (ГИС), в локальных областях которой с высокой точностью будут определены исходные данные в контрольной точке при совершении пуска межконтинентальной баллистической ракеты наземных подвижных ракетных комплексов, а также для маневренных беспилотных летательных аппаратов (ракет) малой дальности;

– оперативное создание многоинформационной картографической и топографической основы различных масштабов с учетом корреляционной зависимости навигационно-геодезической и геофизической информации в «базовых» точках и др.

## Список используемых источников

1. *Васильев И.В., Коробов А.В., Побединский Г.Г.* Основные направления топографо-геодезического и картографического обеспечения Российской Федерации // Геодезия и картография. – 2015. – Вып. №3: Геопрофи. – С.3–10.

2. *Лисицкий Д.В., Радченко Л.К.* Навигационная картография – проблемы и задачи // МНК «ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2016». – Новосибирск, 2016. – Т.1. – С.86–92.

3. *Лупанчук В.Ю.* Перспективы развития навигационной картографии в задачах определения навигационно-геодезических параметров точки старта летательных аппаратов // Гагаринские чтения-2017. XLIII Международная молодежная научная конференция: сб. тезисов докладов. – М.: МАИ [Национальный исследовательский университет], 2017.

4. *Степанов О.А.* Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. – СПб., 2002. – 370 с.

5. *Лупанчук В.Ю.* Аналитический метод определения компонент поля ускорения силы тяжести, с привлечением дополнительно подготовленной геодезической информации // Сборник трудов V межвузовской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития средств и методов выполнения топографо-геодезических и картографических работ, пути совершенствования подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения действий войск». – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – С.189–192.

6. *Heiskanen A., Moritz H.* Physical Geodesy. – Graz, Austria., 1993. – 375 p.

А.А. Абдурахимов,  
*доктор техн. наук;*  
А.В. Барцевич,  
*кандидат техн. наук;*  
М.С. Карев

## **МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

В статье рассмотрены вопросы моделирования функционирования космического аппарата наблюдения методом статистического имитационного моделирования. Обоснован выбор показателя качества системы управления движением КА, и разработана методика его оценивания по результатам применения космического аппарата, функционирующего в условиях внешних деструктивных воздействий.

Ключевые слова: космический аппарат, наблюдение, система управления движением, деструктивное воздействие, угловое положение.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Создание и развитие космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли являются в настоящее время одним из важнейших направлений применения космической техники для решения социально-экономических, научных и военных задач. В условиях стремительно изменяющейся военно-политической обстановки в мире неуклонно растет потребность в оперативном получении сведений об объектах, находящихся за пределами Российской Федерации. Получение этих сведений невозможно без использования автоматических космических аппаратов (КА) наблюдения.

В процессе создания и эксплуатации к КА наблюдения предъявляется ряд требований, выполнение которых позволит получать интересующую потребителя информацию в установленное время с требуемым качеством. Для этого требуемым качеством должен обладать и сам КА. Требования к КА задаются условиями, которым должны отвечать значения показателей его существенных свойств [1]. Однако в процессе летной эксплуатации КА подвергается различным деструктивным воздействиям (ДВ) естественного и искусственного происхождения, в результате которых снижается качество его отдельных систем и элементов и как следствие – всего КА [2, 3]. По этой причине исследование последствий ДВ на КА является актуальной задачей.

### **ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ**

Под качеством КА понимается комплексное свойство КА, характеризующее его пригодность для выполнения поставленной задачи [1]. Основной задачей КА наблюдения является съемка требуемого участка местности в пределах полосы обзора с требуемым качеством. Для выполнения этой задачи бортовой цифровой вычислительной машине необходима информация от чувствительных элементов системы управления движением (СУД) КА о параметрах его углового движения [4, 5]. Эта информация используется вычислительными средствами КА, где по заранее заложенным алгоритмам формируется программа управления угловым движением, в соответствии с которой управляющие сигналы поступают на исполнительные органы системы управления угловым движением (СУУД), и происходит поворот КА относи-

тельно центра масс с целью наведения оптической оси целевой аппаратуры на требуемый участок местности.

В состав СУУД КА входит множество элементов, таких как исполнительные органы, оптические и инерциальные датчики [6], которые в разной степени подвержены внешним ДВ. Проведенный анализ СУУД КА показал [7], что в наибольшей степени влиянию ДВ подвержены оптические датчики (ОД), расположенные на внешних элементах конструкции КА. Это объясняется сложностями при реализации мероприятий по защите ОД от внешних воздействий. Использование дополнительных механических устройств, способных обеспечить защиту ОД, неуклонно повлечет за собой увеличение массы КА и электропотребления на борту КА, при этом вероятность безотказной работы совокупности ОД и защитного устройства снизится. Функционирование ОД связано с регистрацией потока излучения от внешних источников, таких как Земля, Солнце, звезды и преобразования этого потока излучения в управляющий электрический сигнал, по амплитуде и знаку которого рассчитывается текущее угловое положение КА [8–11]. В результате повреждения оптических датчиков в бортовую цифровую вычислительную машину КА поступает ложный управляющий сигнал, что приводит к возникновению ошибки в определении текущего углового положения и как следствие – к ошибке при нацеливании на требуемый район для съемки [12]. Эти обстоятельства обуславливают необходимость создания методики оценивания качества СУУД КА, функционирующего в условиях внешних ДВ.

Оценивание качества СУУД КА представляет собой вычисление значения некоторого показателя и сравнение его с требуемым или заданным значением. Для решения этой задачи необходимо обоснованно выбрать показатель и произвести оценку технического состояния всей СУУД, в составе которой имеется хотя бы один поврежденный оптический датчик.

Одними из задач, решаемых СУУД в процессе функционирования КА, являются приведение КА в ориентированное положение и поддержание требуемой ориентации с заданной точностью в различных режимах функционирования КА путем совмещения одноименных осей базовой и связанной систем координат. Таким образом, работоспособность СУУД КА выражается в ее способности поддерживать значения углов отклонения и угловых скоростей по всем осям в допустимых пределах в течение требуемого времени функционирования КА [13]:

$$G: \left( (\mathbf{V} \in \mathbf{V}^{\text{TP}}) \wedge (\boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{\omega}^{\text{TP}}) \wedge (\Delta t_{\text{раб}} \geq \Delta t_{\text{тр}}) \right), \quad (1)$$

где  $\mathbf{V}$  – вектор углового положения КА;  
 $\mathbf{V}^{\text{TP}}$  – вектор требуемого углового положения КА;  
 $\boldsymbol{\omega}$  – вектор угловых скоростей КА;  
 $\boldsymbol{\omega}^{\text{TP}}$  – вектор требуемых угловых скоростей;  
 $\Delta t_{\text{раб}}$  – время функционирования КА;  
 $\Delta t_{\text{тр}}$  – требуемое время функционирования КА.

С учетом того, что инерциальные датчики хорошо защищены, по сравнению с оптическими, выражение (1) примет вид

$$G: \left( (\mathbf{V} \in \mathbf{V}^{\text{TP}}) \wedge (\Delta t_{\text{раб}} \geq \Delta t_{\text{тр}}) \right). \quad (2)$$

В указанном случае вывод о техническом состоянии СУУД КА можно сделать, рассчитав угловое положение КА на основе математической модели деградации характеристик оптического датчика, позволяющей определить фактический угол отклонения поврежденного датчика через угловую характеристику исправного датчика ( $\gamma_i$ ) с учетом изменения оптических характеристик его элементов [14]. Следовательно,

$$\gamma_d = \gamma_i \tau_r \frac{\tau^+ + \tau^-}{2} + a_k \tau_r (\tau^+ - \tau^-), \quad (3)$$

где  $\gamma_d$  – фактический угол отклонения поврежденного датчика;  
 $\tau_r$  – коэффициент направленного пропускания элемента, пропускающего суммарный поток излучения;

- $\tau^+, \tau^-$  – средние коэффициенты пропускания трактов оптической системы датчика, по которым к чувствительным элементам поступают световые потоки, характеризующие положительное и отрицательное отклонение оси датчика от направления на источник излучения соответственно;
- $a_k$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий конструктивные особенности и условия функционирования датчика.

Следует отметить, что выражение (3) позволяет определять угловую характеристику ОД только по одному каналу управления, однако выход этого параметра за пределы требуемых значений приведет к нарушению условия (2). Поэтому, учитывая идентичные алгоритмы обработки информации по всем каналам управления, а также для снижения вычислительной сложности достаточно вычислить показатель качества функционирования СУУД, при нарушении угловой характеристики ОД по одному каналу управления.

В результате расчетов по выражению (3) получен график зависимости величины ошибки в определении углового положения КА от коэффициента пропускания ( $\tau^+, \tau^-$ ), при различных значениях  $\gamma_i$  (рис. 1).

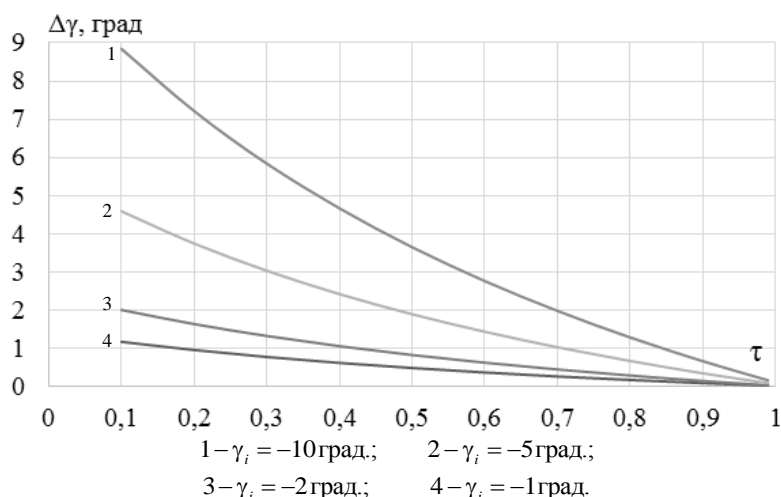


Рис. 1. Зависимость величины ошибки в определении углового положения КА от коэффициента пропускания элементов оптического тракта датчика

Функционирование СУУД КА определяется наличием множества случайных факторов вероятностной внешней и внутренней природы. Поэтому и результаты функционирования СУУД в условиях ДВ будут случайными. Однако оценка технического состояния СУУД никоим образом не дает представления о качестве КА наблюдения, заключающегося в получении снимков Земной поверхности.

Требуемое качество КА наблюдения определяется требованиями заказчика и описывается следующим выражением:

$$Y_{\text{ТР}} = \langle g_{\text{ТР}}(t), l_{\text{ТР}}(t), j_{\text{ТР}}(t), h_{\text{ТР}}(t), d_{\text{ТР}}(t), s_{\text{ТР}}(t) \rangle, \quad (4)$$

- где  $g_{\text{ТР}}(t)$  – требуемая точность удержания углового положения;
- $l_{\text{ТР}}(t)$  – требуемая точность привязки снимка к геодезическим координатам;
- $j_{\text{ТР}}(t)$  – требуемая производительность КА;
- $h_{\text{ТР}}(t)$  – требуемая ширина полосы обзора;
- $d_{\text{ТР}}(t)$  – требуемая ширина полосы захвата;
- $s_{\text{ТР}}(t)$  – требуемая ширина спектральной области съемки целевой аппаратуры.

В общем случае ДВ носят случайный характер, поэтому и результат функционирования СУУД во время и после воздействия представляется случайным, зависящим от многих факторов. Выполнение КА задачи возможно лишь при нахождении в работоспособном состоянии СУУД. Тогда как показатель качества СУУД может быть использована вероятность

выполнения КА наблюдения своей задачи при условии, что остальные системы КА находятся в работоспособном состоянии. При этом

$$P_{КА} = P_{суд}(\Delta\hat{\gamma}_{факт} \leq \Delta\gamma_{тр} \cap \Delta\hat{l}_{факт} \leq \Delta l_{тр} \cap \Delta t_{раб} \leq \Delta t_{тр}). \quad (5)$$

где  $\Delta\hat{\gamma}_{факт}$  – фактическая ошибка в определении углового положения;  
 $\Delta\gamma_{тр}$  – допустимая ошибка в определении углового положения;  
 $\Delta\hat{l}_{факт}$  – фактическая ошибка в определении координат наблюдаемого объекта;  
 $\Delta l_{тр}$  – допустимая ошибка в определении координат наблюдаемого объекта;  
 $\wedge$  – знак, который используется для обозначения величин, носящих случайный характер.

Для получения оценки показателя качества выполнения КА своей задачи в условиях внешних ДВ можно использовать метод статистического имитационного моделирования (СИМ) [1]. Преимущества этого метода заключаются в возможности с его помощью моделировать функционирование систем практически любой сложности с высокой степенью адекватности. Кроме того, метод СИМ предоставляет широкие возможности по применению современной вычислительной техники. Целью моделирования при оценивании качества КА является определение показателя – вероятности выполнения КА задачи после воздействия деструктивных факторов, зависящего от ряда случайных факторов, как отношения числа испытаний, в которых КА выполнил задачу с требуемым качеством, к общему числу испытаний [15]:

$$P_{КА} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i^{факт}}{n}, \quad (6)$$

где  $m_i^{факт}$  – количество опытов, удовлетворяющих условию  $\Delta\hat{l}_{факт} \leq \Delta l_{тр}$ .

В каждой из  $N$  реализаций процесса на модели рассматриваемое событие может наступать или не наступать. Результат, полученный методом СИМ, неизбежно носит случайный характер. Точность оценки зависит от количества испытаний. Под точностью оценки понимается ее отклонение от истинного значения исследуемой величины, а под относительной точностью – отклонение, выраженное в процентах от максимально возможного отклонения. Важно отметить, что истинное значение исследуемой величины не может быть известно точно.

Количество опытов, проводимых для получения оценки показателя качества функционирования КА, определяется исходя из требуемой точности оценивания, характеризуемой величиной доверительной вероятности  $\beta$  отклонения значения полученной оценки показателя от его истинного значения не более чем на половину доверительного интервала  $\varepsilon$ . Для расчета необходимого числа опытов  $N$  воспользуемся выражением [15, 16]

$$N = \frac{p(1-p)}{\varepsilon^2} t_{\beta}^2, \quad (7)$$

где  $t_{\beta}$  – табличная величина, выбираемая в соответствии с требуемой доверительной вероятностью  $\beta$ ;  
 $p$  – значение вычисляемого показателя, которое на этапе расчета необходимого количества опытов неизвестно.

Поэтому берется предполагаемое значение показателя, и после проведения полученного числа испытаний значение  $N$  уточняется [15]. Если в ходе численного эксперимента производится расчет нескольких показателей, значения которых могут лежать в довольно широком диапазоне, то должно быть проведено максимально возможное число опытов, соответствующее значению  $p=0,5$ .

Интервальная оценка качества КА может быть получена с использованием имитационного моделирования следующим образом:

1. Задается требуемая относительная точность оценки  $\varepsilon$ .
2. Определяется необходимое количество испытаний  $N$  по формуле (7).
3. Выполняется  $N$  испытаний имитационной модели.
4. По результатам имитационного моделирования вычисляются точечные оценки  $P$ .



5. Определяется точность полученных оценок.

6. Определяются интервальные оценки по формуле  $\bar{P} \pm \varepsilon$ , где  $\bar{P}$  – точечная оценка вероятности, вычисленная по результатам конкретной совокупности испытаний;  $\varepsilon$  – точность оценки.

Построение интервальной оценки с доверительной вероятностью, равной единице, невозможно, так как для этого требуется бесконечное количество испытаний. Таким образом, метод СИМ позволяет оценить результаты воздействия на КА путем расчета значения показателя качества с заданной относительной точностью и доверительной вероятностью.

На рис. 2 представлен график зависимости количества испытаний от точности оценки при заданной доверительной вероятности 0,95, полученный по результатам расчета выражения (7). Установлено, что для получения искомого показателя качества КА с требуемой точностью необходимо провести не менее 2401 опыта.

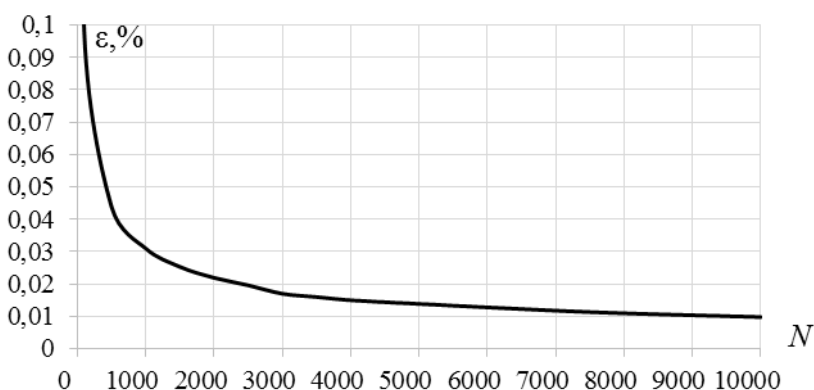


Рис. 2. Зависимость количества требуемых экспериментов от точности оценки для случая частотности выпадения случайного события  $p=0,5$

Важным моментом, который также необходимо рассмотреть, является выбор системного времени при имитационном моделировании. В соответствии с общепринятыми представлениями при имитационном моделировании сложных систем применяют принцип агрегирования, позволяющий разбить сложную модель на относительно простые составные части. При моделировании функционирования СУУД КА в качестве составных частей модели могут выступать элементы системы, обладающие достаточной функциональной самостоятельностью и относительно небольшим числом внешних связей. В имитационной модели определение показателя качества СУУД КА осуществляется алгоритмически, на основании результатов действий, выполняемых отдельными элементами модели. Все эти действия должны быть скоординированы по времени, иначе возможно нарушение причинно-следственных связей, ведущее к получению ошибочных результатов исследования в целом. Для определения порядка изменения временной координаты и согласования различных событий в моделируемой системе используется механизм системного времени, общий для всех элементов системы. Выделяют два основных механизма системного времени [17]:

– синхронизация событий через заданный постоянный относительно небольшой интервал времени. При этом события считаются наступившими в момент окончания выбранного интервала;

– синхронизация моделей по особым состояниям. При этом моменты синхронизации строго соответствуют моментам наступления событий в любом из элементов модели.

Особенностью моделирования СУУД КА как сложной системы является необходимость использования первого из перечисленных механизмов системного времени для элементов с отличающейся динамикой процессов.

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАБЛЮДЕНИЯ

При выполнении расчетов методом СИМ случайными принято считать:

- время воздействия деструктивных факторов ( $t_{\text{возд}}$ );
- ракурс и энергию воздействия ( $\alpha_{\text{возд}}$ ,  $\delta_{\text{возд}}$ ,  $E_{\text{дв}}$ );
- режим функционирования КА ( $R_f$ ).

Достоверно неизвестно, в какой момент времени КА подвергнется воздействию по причине отсутствия информации о параметрах воздействующего фактора и направлении, с которого произойдет воздействие. Очевидно, что случайная величина, характеризующая время воздействия на КА, является непрерывной и может принимать значения только в заранее заданном временном интервале  $[t_0; T]$ , где  $t_0$  – время начала отсчета,  $T$  – период обращения КА наблюдения, а плотность ее распределения в этом интервале времени постоянна. Поэтому при расчетах принято, что случайная величина  $t_{\text{возд}}$  имеет равномерное распределение в интервале времени  $[t_0; T]$ , а функция плотности распределения имеет вид

$$f(t_{\text{возд}}) = \begin{cases} \frac{1}{T-t_0}, & t_{\text{возд}} \in [t_0, T] \\ 0, & t_{\text{возд}} \notin [t_0, T] \end{cases} \quad (8)$$

Для характеристики влияния ракурса и энергии воздействия деструктивных факторов на качество КА может быть использована индикатриса уязвимости КА – зависимость вероятности утраты работоспособного состояния КА в течение заданного времени от ракурса воздействия деструктивных факторов при фиксированных значениях остальных параметров воздействия:

$$U^\omega(\alpha, \delta) = U(\alpha, \delta, d^\omega), d^\omega = d^* \setminus \{\alpha, \delta\}, \quad (9)$$

- где  $\alpha, \delta$  – углы места и азимута вектора воздействия деструктивных факторов, характеризующие ракурс воздействия в связанной системе координат КА (рис. 3);  
 $d^*$  – вектор фиксированных значений параметров, характеризующих условия воздействия деструктивных факторов, в составе которого варьируются переменные, определяющие ракурс воздействия.

Пример графического представления индикатрисы уязвимости типового КА наблюдения к

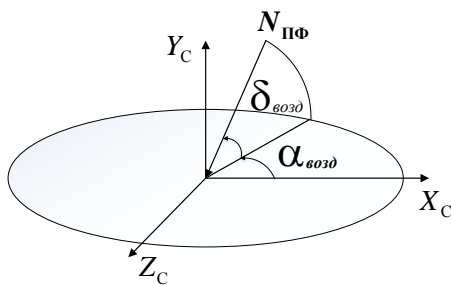


Рис. 3. Угол места и азимут в ССК

воздействию микрометеорных потоков представлен на рис. 4. В силу наличия множества неопределенностей как в процессе воздействия деструктивных факторов, так и в процессе функционирования КА, ракурс воздействия можно оценить только с определенной вероятностью. Однако, если известен закон распределения вероятности воздействия с заданного ракурса в пределах некоторого телесного угла  $\Omega$ , индикатриса уязвимости позволяет рассчитать вероятность утраты работоспособного состояния КА при воздействии с направления, ограниченного углом  $\Omega$ :

$$P_{\Pi}(\Omega) = \int_{(\Omega)} U^\omega(\alpha, \delta) \cdot f_{\text{дв}}^\omega(\alpha, \delta) d\omega, \quad (10)$$

где  $f_{\text{дв}}^\omega(\alpha, \delta)$  – плотность распределения вероятности воздействия с ракурса, определенного углами  $\langle \alpha, \delta \rangle$  (рис. 4), определяемая соотношением

$$f_{\text{дв}}^\omega(\alpha, \delta) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{P_{\text{дв}}(\Delta\omega)}{\Delta\omega}. \quad (11)$$

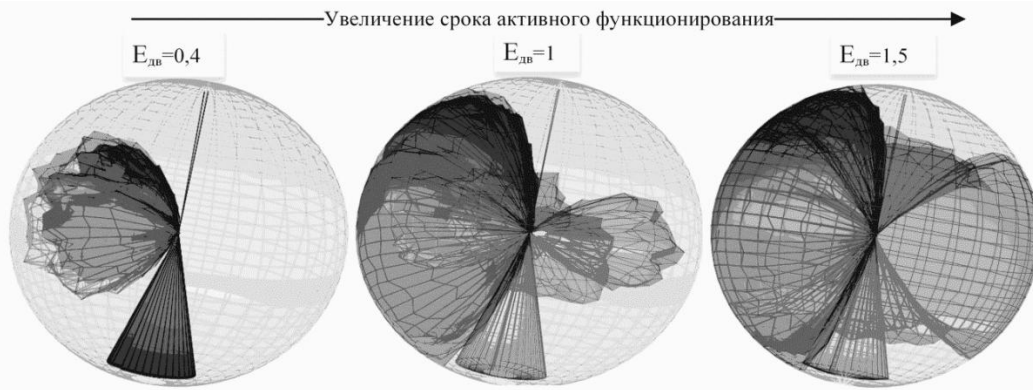


Рис. 4. Пример графического представления индикатрисы уязвимости КА наблюдения к микрометеорному воздействию

При этом интеграл функции  $f_{ДВ}^{\omega}(\alpha, \delta)$  по углу  $\Omega$  представляет собой вероятность воздействия с направления, ограниченного телесным углом  $\Omega$ :

$$P_{ДВ}(\Omega) = \int_{(\Omega)} f_{ДВ}^{\omega}(\alpha, \delta) d\omega, \quad (12)$$

а интеграл по полному углу  $4\pi$  стерадиан характеризует вероятность воздействия на КА с любого ракурса:

$$P_{ДВ} = \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f_{ДВ}^{\omega}(\alpha, \delta) \cos\alpha \, d\alpha \, d\delta. \quad (13)$$

При исследовании уязвимости КА целесообразно нормировать  $f_{ДВ}^{\omega}(\alpha, \delta)$  так, чтобы выполнялось условие

$$\int_{(\Omega)} f_{ДВ}^{\omega}(\alpha, \delta) d\omega = 1. \quad (14)$$

Закон распределения ракурса и энергии воздействия строится для каждого сочетания деструктивного фактора и КА, а также алгоритмов их функционирования [18].

В процессе функционирования КА в бортовой цифровой вычислительной машине реализуются различные режимы функционирования бортовых систем, в результате чего КА совершает различные программные повороты относительно центра масс. В качестве примера можно привести режим дежурной ориентации, при котором КА поворачивается панелями солнечных батарей к Солнцу для зарядки химических батарей. При воздействии на КА, находящийся в этом режиме, в момент времени  $t_{\text{возд}} \in [t_0; T]$  положение КА на орбите известно, соответственно, можно рассчитать положение Солнца и угловое положение КА. Однако на интервале времени  $[t_0; T]$  КА функционирует в различных режимах, длительность и последовательность которых, в общем случае, изменяется случайным образом для каждого интервала. Учитывая непрерывный характер функционирования КА на орбите можно сделать вывод, что случайная величина  $R_f$ , характеризующая функционирование КА в определенном режиме, является непрерывной и принимает значения только на рассматриваемом интервале. Поэтому при расчетах принято, что случайная величина  $R_f$  имеет равномерное распределение на интервале  $[t_0; T]$ .

Угловое положение КА в момент  $t_{\text{возд}}$  зависит от режима функционирования КА и может изменяться в определенных пределах для каждого режима. Однако не для всех режимов можно рассчитать угловое положение в момент  $t_{\text{возд}}$ . При функционировании КА в режиме выполнения задачи его угловое положение определяется заложенной программой работы аппаратуры, которая, в свою очередь, также случайна. При этом диапазон угловых отклонений по всем каналам управления строго ограничен, что напрямую связано с назначением КА наблюдения, которое заключается в получении снимков земной поверхности с требуемым качеством. Известно, что при съемке в надир получают наиболее качественные снимки так как в этом режиме наклонная дальность до объекта минимальна и отсутствуют геометрические искажения снимка.

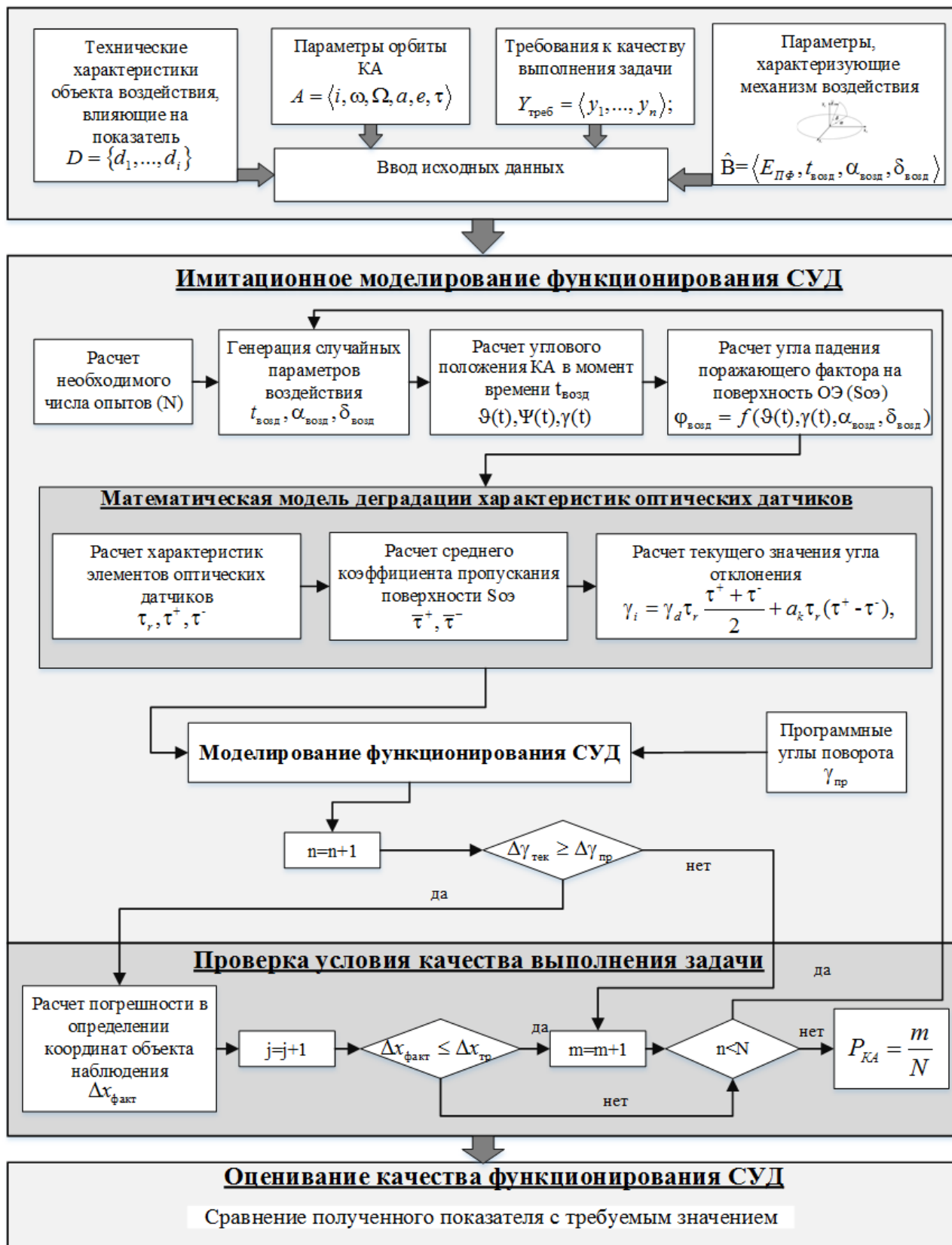


Рис. 5. Структура методики оценивания качества функционирования СУУД в условиях деструктивных воздействий

Исходя из вышесказанного, целесообразно предположить, что для достижения требуемого качества получаемых снимков программа функционирования КА будет составлена таким образом, чтобы КА проводил съемку в небольших диапазонах углов  $\Delta\gamma$  отклонения от надира. В этом случае примем, что случайная величина  $\gamma$ , характеризующая угловое положение КА, функционирующего в режиме выполнения задачи, распределяется по усеченному нормальному закону распределения:

$$f(\gamma) = \frac{1}{C\sigma_\gamma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\gamma-M_\gamma)^2}{2\sigma_\gamma^2}} \Delta(\gamma - \gamma^{\min})\Delta(\gamma^{\max} - \gamma), \quad (15)$$

где  $C$  – нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой  $f(\gamma)$  равна 1. Значит,

$$C \int_{\gamma^{\min}}^{\gamma^{\max}} f(\gamma) d\gamma = 1$$

$$C = \frac{1}{\int_{\gamma^{\min}}^{\gamma^{\max}} f(\gamma) d\gamma} = \frac{1}{F(\gamma^{\max}) - F(\gamma^{\min})}. \quad (16)$$

Следует заметить, что каждому режиму функционирования КА наблюдения соответствует свой закон распределения случайной величины.

Использование метода СИМ для расчета показателя качества КА в условиях ДВ позволяет составить методику оценивания технического состояния СУУД, структура которой представлена на рис. 5. На схеме показано, что оценивание качества СУУД КА осуществляется в два этапа.

На *первом этапе* производится расчет показателя методом СИМ. При этом следует учесть, что выбор промежутка времени, в течение которого производится моделирование процесса функционирования СУУД, осуществляется исходя из заданного времени функционирования КА, входящего в состав рассчитываемого показателя. В случае целенаправленных воздействий, в результате которых изменение характеристик СУУД может произойти в достаточно короткие сроки, моделирование функционирования СУУД необходимо осуществлять в течении заданного времени после воздействия. Так как в данном случае результатом оценивания качества СУУД является вывод о возможности КА выполнять свои задачи в течение довольно длительного времени, то нет необходимости в моделировании работы СУУД в течение всего промежутка времени  $\Delta t_{\text{тр}}$ , поэтому вывод о ее состоянии может быть сделан по результатам функционирования СУУД в течение относительно короткого интервала времени после воздействия.

На *втором этапе* оценивания качества функционирования КА наблюдения к внешним ДВ происходит сравнение полученного показателя с заданным или требуемым значением этой величины. Принятие решения о требуемом значении показателя является прерогативой лица, использующего предложенную методику.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет с необходимой точностью оценивать качество КА наблюдения, функционирующего в условиях воздействия деструктивных факторов естественного и искусственного происхождения. Новизна представленной методики заключается в том, что при моделировании функционирования СУУД КА произведен учет повреждений оптических элементов ОД, возникающих на всей глубине оптического тракта. Применение данной методики позволит не только оценивать качество функционирования КА наблюдения на ранних этапах проектирования, но и предлагать конкретные рекомендации по повышению качества функционирования существующих КА наблюдения.

### Список используемых источников

1. *Петухов Г.Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – МО СССР, 1989. – Ч.1: Методология, методы, модели. – 660 с.
2. *Новиков Л.С.* Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: учеб. пособие. – М.: Университетская книга, 2009. – 104 с.
3. *Акишин А.И.* Космическое материаловедение: метод. и учеб. пособие. – М.: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
4. *Люхин А.В., Умбиталиев А.А.* Задачи космических оборонных видеоинформационных систем // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2013. – № 2. – С. 3–14.
5. *Ефимов В.В., Миронов В.И., Силантьев С.Б.* Системы управления космических аппаратов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. – 2010. – Ч.2: Механика полета. – 529 с.
6. Основные условия и принципы функционирования космических аппаратов: учеб. пособие / А.А. Абдурахимов, А.М. Денисов, Д.А. Мосин и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. – 87 с.
7. *Карев М.С.* Влияние внешних деструктивных воздействий на изменение характеристик оптических датчиков системы управления движением космического аппарата // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2017. – №2. – С. 112–117.
8. *Федосеев В.И., Колосов М.П.* Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие. – М.: Логос, 2007. – 248 с.
9. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учеб. пособие / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бурдыгов, С.В. Гордийко и др.; под ред. А.С. Сырова. – М.: МАИ ПРИНТ, 2010. – 304 с.
10. *Баринов К.Н., Бурдаев В.Н., Мамон П.А.* Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 270 с.
11. *Изнар А.Н., Павлов А.В., Федоров Б.Ф.* Оптико-электронные приборы космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
12. *Абдурахимов А.А., Кукушкин И.О.* Моделирование изменения характеристик оптических датчиков ориентации космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, № 9. – С. 41–46.
13. Системы управления космических аппаратов / В.В. Бурмистров, А.А. Лукашевский, А.М. Ричняк и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 188 с.
14. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 2001. – 576 с.
15. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968. – 356 с.
16. *Лебедев Е.Л.* Основы метрологии: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 115 с.
17. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
18. *Абдурахимов А.А.* Система показателей стойкости космических аппаратов к воздействию неблагоприятных факторов космического пространства // Актуальные проблемы защиты и безопасности: труды XIX Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. 4–7 апреля 2016 г. – М.: РАРАН, 2016. – С.139–143.

Д.Р. Абсалямов,  
*доктор техн. наук;*  
М.А. Марченко,  
*кандидат техн. наук;*  
Д.В. Шаповалов

## **ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В МОЩНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ СХЕМОЙ СИСТЕМЫ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ**

Предлагается подход сбережения энергоресурсов при эксплуатации холодильных машин систем обеспечения температурно влажностного режима за счет применения переменной структуры элементной базы системы холодоснабжения в зависимости от нагрузки. Рассматриваются технико-экономические показатели холодильных машин, характеризующие их работу при переходе на использование переменной структуры. Представлены регрессионные модели, характеризующие зависимость технико-экономических показателей холодильных машин от нагрузки при последовательной и параллельной схемах включения. Приведен сравнительный анализ рабочих характеристик холодильных машин при различных схемах подключения.

Ключевые слова: холодильная машина, структурная схема системы холодоснабжения, энергоэффективность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Опыт эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) показал, что меньшая часть подводимой электроэнергии для питания расходуется на полезную работу в виде формирования посылаемых в эфир или обработку принимаемых сигналов. Большая ее часть выделяется в виде тепла, вызывая чрезмерный нагрев элементов РЭА и окружающее их воздушное пространство внутри блока, ячейки. Это повышение температуры ограничено допустимыми, предельными параметрами работы отдельных приборов, после чего возникают сбои, отказы и выход из строя оборудования. Таким образом, температурный режим элементов радиоэлектронной аппаратуры является одним из основных факторов, влияющих на их долговечность и стабильность поддержания их рабочих параметров [1, 7].

Для решения приведенной проблемы и безотказного функционирования РЭА и технологического оборудования, размещенного в радиоэлектронных контейнерах радиолокационных станций (РЛС) большой мощности, необходимо обеспечить бесперебойную работу системы обеспечения температурно влажностного режима (СОТВР), в состав которой входят системы вентиляции и кондиционирования воздуха, энергоснабжения и оборотного водоснабжения. В приведенных системах трансформаторы теплоты – холодильные машины (ХМ) и тепловые насосы (ТН) – являются практически неотъемлемой их частью. В радиоэлектронных контейнерах РЛС большой мощности количество энергии, потребляемой ХМ и ТН, существенно зависит от многих факторов и составляет 20–40% энергии, вырабатываемой автономными энергоисточниками [1, 2, 5, 7]. В итоге появляется необходимость достаточно подробного исследования рабочих процессов различных трансформаторов теплоты.

### **ПРОБЛЕМА ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН СОТВР**

подавляющее большинство изготавливаемых и действующих в настоящее время холодильных машин представляют собой парокompрессионные машины, которые в зависимости от

типа компрессора разделяют на поршневые, ротационные, винтовые, спиральные и центробежные. До последнего времени на СОТВР наиболее широко использовались парокompрессионные машины со спиральными компрессорами, исследованиям которых посвящено значительное количество работ.

Характеристики компрессоров в широком диапазоне температур при работе на различных хладагентах недостаточно изучены. Необходимость исследований диктуется также требованиями экономии энергии и экологическими требованиями. Здесь имеется в виду сокращение загрязнений атмосферы за счет использования новых экологически чистых хладагентов. Все это определило актуальность и необходимость разработки функциональных зависимостей и математических моделей, описывающих физические процессы, протекающие в холодильном компрессоре. Причем основным требованием к этим зависимостям является их универсальность по отношению к различным хладагентам и диапазонам изменения параметров. В связи с этим в комплексных моделях ХМ СОТВР целесообразно использовать более простые обобщенные зависимости энергетических и объемных характеристик.

Полученные зависимости используются для разработки математических моделей прокомпрессионных машин различных видов [3, 6, 8]. При создании адекватных комплексных моделей для исследования, проектирования и эксплуатации ХМ СОТВР, на основании численных экспериментов с помощью разработанных математических моделей, получают обобщенные аналитические выражения для описания:

– энергетических показателей ХМ

$$\varepsilon = Q_0/Ne = f(t_0, t_k, t_{bc}, n, \text{тип хладагента}); \quad (1)$$

– габаритных показателей ХМ

$$q_{vd} = V_H/Q_0 = f(t_0, t_k, t_{bc}, n, \text{тип хладагента}). \quad (2)$$

На энергетические показатели трансформаторов теплоты существенно влияют также конструктивные, компоновочные и схемные решения. За счет различных способов подачи тепло- и холодоносителя, можно изменить температуры кипения и конденсации отдельных агрегатов и, следовательно, сократить энергопотребление установки в целом.

В СОТВР, согласно [1, 2], рекомендуется устанавливать от двух до пяти машин одинаковой производительности. Зачастую конденсаторы нескольких машин подключают для охлаждения по параллельной схеме (рис.1,а). Такое подключение позволяет облегчить эксплуатацию установок. Вместе с тем необходимость сокращения расхода охлаждающей среды требует максимального увеличения перепада температур на входе и выходе из конденсаторов. Необходимая величина перепада температур может достигать 20–40°C, в то время как для серийно выпускаемых установок – 5–7°C. Для обеспечения требуемых температурных условий работы холодильных машин необходимо либо подмешивание отработавшей воды, либо включение дополнительного контура с промежуточным теплообменником. Оба эти мероприятия нерациональны с точки зрения затрат энергии.

### **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН СОТВР ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Подключение конденсаторов холодильных машин последовательно по охлаждающей воде (рис. 1,б) позволит снизить температуру конденсации и затраты энергии в первых по ходу движения охлаждающей среды машинах. При этом уменьшаются температурные перепады в каждом конденсаторе.



Для тепловых насосов целесообразным является последовательное подключение испарителей холодильных машин по хладоносителю. Такое решение принесет существенный эффект при больших перепадах температуры хладоносителя, например, при использовании вторичных энергетических ресурсов с достаточно высоким температурным потенциалом, а также для систем кондиционирования воздуха с поверхностными воздухоохладителями.

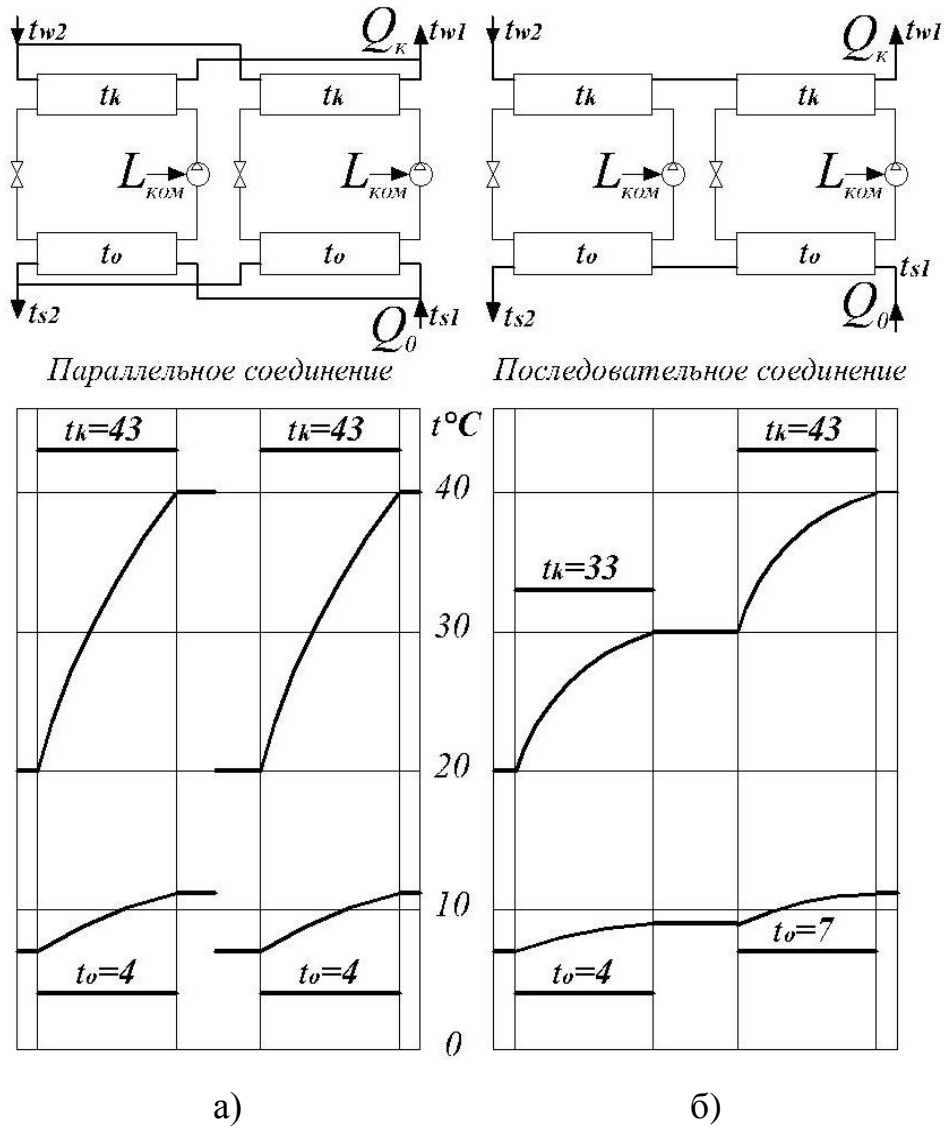


Рис. 1. Влияние схемы подключения испарителей и конденсаторов трансформаторов теплоты

Энергетические характеристики холодильной установки, состоящей из нескольких машин, подключенных последовательно по конденсаторам и испарителям, могут быть определены по следующим зависимостям.

Будем считать равными перепады в рассматриваемых аппаратах, тогда температуры конденсации и кипения для каждой машины в первом приближении [4] будут следующими:

$$t_{ki} = t_{w1} + \frac{\Delta t_w}{n} i + \frac{\Delta t_w}{n(\exp(\frac{\Delta t_w}{nQ_k}) - 1)}, \quad (3)$$

$$t_{0i} = t_{s2} + \frac{\Delta t_s}{n} i + \frac{\Delta t_s \exp(\frac{\Delta t_s}{nQ_s})}{n(\exp(\frac{\Delta t_s}{nQ_s}) - 1)}, \quad (4)$$

где  $t_k, t_0$  – температуры конденсации и кипения в рассматриваемой машине;  
 $\Delta t_w, \Delta t_s$  – соответственно, перепады температур тепло- и хладоносителя в конденсаторах и испарителях холодильной установки;  
 $n$  – количество и порядковый номер рассматриваемой машины;  
 $Q_k, Q_s$  – средние логарифмические перепады температур в конденсаторах и испарителях.

Холодопроизводительность и мощность, потребляемая компрессорами машин, равны:

$$Q_0 = \sum_{i=1}^n V_{hi} q_{vdi}; \quad N_{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{V_{hi} q_{vdi}}{\varepsilon_i}, \quad (5)$$

где  $V_{hi}$  – объем, описываемый спиралями соответствующего компрессора, а  $\varepsilon_i, q_i$  определены по формулам (1) и (2).

Учитывая, что при последовательном подключении аппаратов холодильных машин последние работают в разных температурных режимах, необходимо уточнить перепады температур в каждом аппарате по следующим зависимостям:

$$\Delta t_{wi} = \frac{V_{hi} q_{vhi} (1 + \frac{1}{\varepsilon_i})}{\sum_{i=1}^n V_{hi} q_{vdi} (1 + \frac{1}{\varepsilon_i})} \Delta t_w, \quad (6)$$

$$\Delta t_{si} = \frac{V_{hi} q_{vhi}}{\sum_{i=1}^n V_{hi} q_{vdi}} \Delta t_s. \quad (7)$$

Далее уточняем температуры конденсации и кипения, учитывая формулы (6) и (7):

$$t_{ki} = t_{w1} + \sum_{j=1}^i \Delta t_{wj} + \frac{\Delta t_{wj}}{\exp(\frac{\Delta t_{wj}}{nQ_{ki}}) - 1}, \quad (8)$$

$$t_{0i} = t_{s2} + \sum_{j=1}^i \Delta t_{sj} + \frac{\Delta t_{ws} \exp(\frac{\Delta t_{si}}{Q_{si}})}{\exp(\frac{\Delta t_{wj}}{nQ_{ki}}) - 1}. \quad (9)$$

При несовпадении, в пределах требуемой точности, с данными, полученными по выражениям (2) и (3), производят повторные вычисления, начиная с (4) и (5). Для достижения точности, необходимой в инженерных расчетах, обычно достаточно двух-трех итераций [3, 4].

По описанной методике произведен сравнительный анализ энергетических характеристик установок, состоящих из различного количества одинаковых ХМ, работающих на R132 с последовательно и параллельно подключенными конденсаторами.

На рис. 2. показана зависимость изменения относительной холодопроизводительности  $\bar{Q}_0 = \frac{q_0^{\text{доп}}}{q_0^{\text{пар}}}$  при последовательном и параллельном подключении конденсаторов от суммарного перепада температуры охлаждающей воды  $\Delta t_w$ . Как следует из графиков, при значении  $\Delta t_w = 20^\circ\text{C}$  имеет место заметное увеличение холодопроизводительности для последовательно подключенных машин, которое составляет от 5 до 20% при  $\Delta t_w = 20\div 40^\circ\text{C}$ .

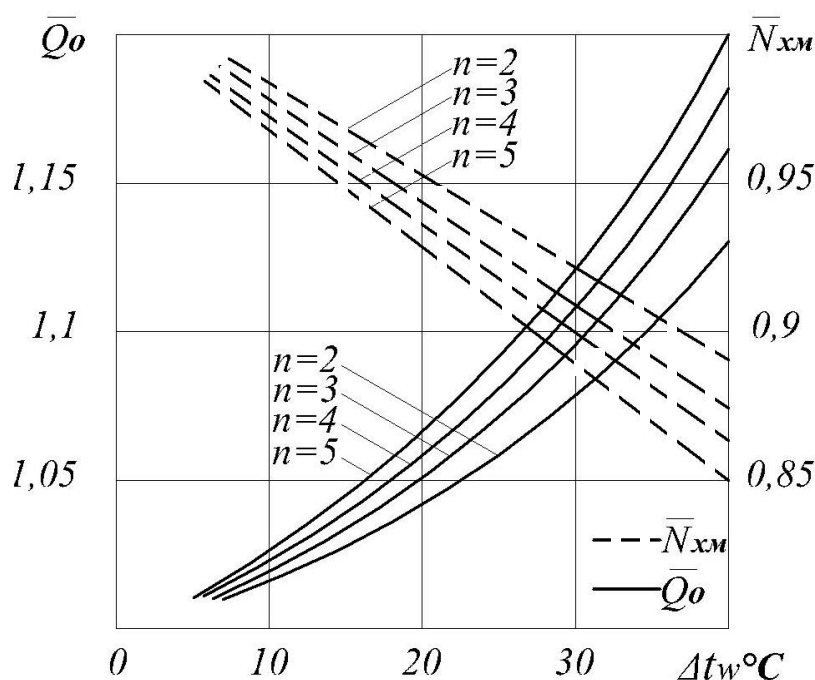


Рис. 2. Зависимость относительного изменения холодопроизводительности  $Q_0$  и мощности трансформаторов теплоты  $N_{ХМ}$  от суммарного перепада температуры  $\Delta t_w$  и количества машин

На данном рисунке представлены результаты сравнения потребляемой мощности компрессорами холодильных машин и тепловых насосов. Здесь наблюдается снижение энергозатрат от 5 до 15% при  $\Delta t_w = 20\div 40^\circ\text{C}$ .

В целом повышение энергетической эффективности холодильной системы при последовательном включении только конденсаторов представлено на рис.3 зависимостью изменения относительной величины холодильного коэффициента  $\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon^{\text{пос}}}{\epsilon^{\text{пар}}}$ . Ее значение в указанных условиях изменяется на 10–40%. Необходимо отметить, что больший эффект достигается при увеличении количества включенных машин (в рассматриваемых примерах – от двух до пяти), хотя энергетические показатели установок из трех и более машин достаточно близки. Вместе с тем вопрос об оптимальном их количестве не может считаться окончательно

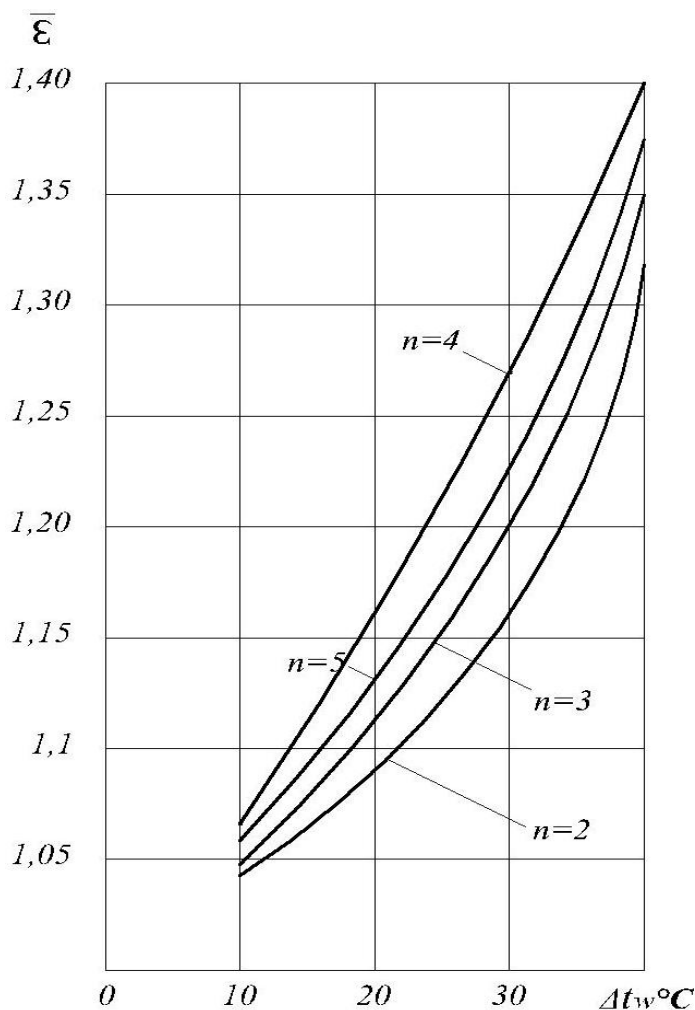


Рис.3. Изменение относительной величины холодильного коэффициента в зависимости от суммарного перепада температур  $\Delta t_w$  и количества машин

решенным без рассмотрения гидравлических характеристик систем охлаждения конденсаторов, надежности их работы, габаритных показателей самих машин и ряда других не менее важных факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтверждает целесообразность использования параллельных и последовательных схем соединения конденсаторов ХМ в зависимости от требуемой холодопроизводительности, а полученные модели удельной энергоемкости и удельной холодопроизводительности позволяют численно определить момент переключений от одной структуры к другой.

Использование переменной структуры ХМ позволяет снизить потребляемую мощность на производство единицы холода в среднем на 10–15% и увеличить удельную холодопроизводительность в среднем на 13–19% по сравнению с существующими схемами, работающими по параллельной структуре подключения конденсаторов к системе охлаждения.

Новизна полученного результата обусловлена доказательством целесообразности использования переменной структуры ХМ и обоснованием управляющего параметра, по значению которого осуществляется переключение структур.

### Список используемых источников

1. ГОСТ EN 378-1-2014. Системы холодильные и тепловые насосы. Требования безопасности и охраны окружающей среды. Ч. 1. Основные требования, определения, классификация и критерии выбора. – М.: Стандартинформ, 2016.
2. ГОСТ EN 378-2-2014. Системы холодильные и тепловые насосы. Требования безопасности и охраны окружающей среды. Ч. 2. Проектирование, конструкция, изготовление, испытания, маркировка и документация. – М.: Стандартинформ, 2016.
3. *Абсалямов Д.Р., Курчидис В.А.* Программа для расчета режимов работы системы воздушного термостатирования технических объектов и комплексов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №201319556 «Программа для расчета режимов работы системы воздушного термостатирования технических объектов и комплексов». – Заявка №2013617555 от 20.08.2013.
4. *Бужков С.Н.* Повышение энергетической эффективности эксплуатации систем обеспечения температурно-влажностного режима объектов ракетно-космических комплексов: монография. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012 – 140 с.
5. *Каганович Б.М., Филиппов С.П., Павлов П.П.* Термодинамическое моделирование на графах. – Иркутск, 1998. – 30 с.
6. Эксплуатация технических систем ракетно-космических комплексов: учебник для вузов / под общ. ред. Д.А. Авсюкевича. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 393 с.
7. Энергоресурсосбережение при эксплуатации холодильных машин СОТВР в мощных контейнерных РЛС ДО на основе управления системой термостатирования / Д.Р. Абсалямов, С.Ф. Боев, А.С. Логовский, А.А. Румянцев, Д.В. Шаповалов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 11. – С.55–60.
8. *Яхонтов Ю.К., Белостоцкий В.А., Мучкин В.И.* Автоматизация технических систем: учебник. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1976. – 420 с.

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

## **ЗАТРАТЫ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА СОВЕРШЕНИЕ МАНЕВРА С ЦЕЛЬЮ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЫКАНИЯ ТРАССЫ ПОЛЕТА**

Разработан алгоритм расчета затрат характеристической скорости космического аппарата (КА), необходимых для совершения маневра с исходной орбиты на новую рабочую квазисинхронную. Данный маневр может быть вызван необходимостью наблюдения нового района или при выходе на резервную орбиту. При этом предлагается способ определения параметров новой рабочей квазисинхронной орбиты, удовлетворяющей требованиям потребителя по периодичности наблюдения заданного района и затратам характеристической скорости КА.

Ключевые слова: космический аппарат, квазисинхронная орбита, дистанционное зондирование Земли, характеристическая скорость.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Основным предназначением КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является наблюдение районов на поверхности Земли в интересах решения задач метеорологии, исследования природных ресурсов, мониторинга чрезвычайных ситуаций и т.п. Поскольку местоположение района, в котором необходимо решение задачи ДЗЗ, может быть изменено, то возникает задача перенацеливания КА на новый район в процессе его функционирования.

Одной из характеристик результативности работы КА ДЗЗ по конкретному району является периодичность его наблюдения [1]. Находясь на исходной орбите, КА может не наблюдать вновь заданный район земной поверхности, и условие периодичности наблюдения заданного района не будет выполняться. Тогда возникает необходимость изменения параметров орбиты с помощью совершения маневра. Одним из основных факторов, который ограничивает возможности маневрирования КА, является требуемый для совершения маневра запас характеристической скорости.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ НА СОВЕРШЕНИЕ МАНЕВРА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЫКАНИЯ ТРАССЫ ПОЛЕТА**

В настоящее время, как правило, КА ДЗЗ функционируют на квазисинхронных орбитах. *Квазисинхронная орбита* – это орбита КА, трасса полета которого замыкается через определенные промежутки времени [2]. При этом КА, функционирующий на квазисинхронной орбите, за некоторое целое количество суток –  $m$  совершает полное число витков –  $n$  [3]. Под суточной квазисинхронной орбитой понимают такую орбиту КА, трасса полета которого замыкается через одни сутки, под двухсуточной квазисинхронной орбитой – через двое суток, под трехсуточной – через трое суток и т.д. [4].

Пусть КА функционирует на орбите с параметрами  $\{a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0, \tau_0\}$ . Требуется перевести его на другую рабочую квазисинхронную орбиту с параметрами  $\{a_1, e_1, i_1, \Omega_1, \omega_1, \tau_1\}$  с требуемой периодичностью наблюдения заданного района. Обозначим количество суток, че-

рез которое КА будет вновь находиться над зондируемым районом, как  $t_{\text{зад}}$ . Введем следующее допущение: размеры зоны обзора КА больше, чем размеры района зондирования.

Отношение количества витков  $n$ , совершаемых КА за  $t$  суток, к количеству этих суток обозначим как периодичность замыкания трассы ( $Q$ ):

$$Q = \frac{n}{t}, \quad (1)$$

где  $n$  и  $t$  являются взаимно простыми числами.

Можно получить аналитическую зависимость между затратами характеристической скорости  $\Delta V_{\Sigma}$ , требуемой для перелета КА с исходной на новую рабочую квазисинхронную орбиту, и периодичностью замыкания их трассы.

Из определения квазисинхронной орбиты следует, что

$$\frac{T_{\text{эф}}}{T_{\text{др}}} = \frac{n}{m}. \quad (2)$$

С учетом выражения (1) можно записать соотношение

$$Q = \frac{T_{\text{эф}}}{T_{\text{др}}}, \quad (3)$$

где  $T_{\text{др}}$  – драконический период обращения КА – промежуток времени между двумя последовательными прохождениями КА одной и той же широты (например, экватора);

$T_{\text{эф}}$  – время полного оборота Земли относительно восходящего узла орбиты.

Для вычисления  $T_{\text{эф}}$  и  $T_{\text{др}}$  можно воспользоваться известными формулами [1]:

$$T_{\text{др}} = T \left\{ 1 + \frac{3}{2} c_{20} \left( \frac{a_3}{a} \right)^2 \left[ 3 - \frac{5}{2} \sin^2 i - e \cos \omega (1 - 5 \sin^2 i) \right] \right\}, \quad (4)$$

$$T = 2\pi \frac{a^{3/2}}{\sqrt{\mu}}, \quad (5)$$

$$T_{\text{эф}} = \frac{2\pi}{\omega_3 - \dot{\Omega}}, \quad (6)$$

где  $T$  – период обращения КА при движении по невозмущенной орбите;  
 $a, i, e, \omega$ , – значения кеплеровских элементов орбиты КА при движении по невозмущенной орбите;

$c_{20}$  – коэффициент, учитывающий вторую зональную гармонику;

$a_3$  – экваториальный радиус Земли;

$\mu$  – гравитационная постоянная Земли;

$\omega_3$  – угловая скорость вращения Земли;

$\dot{\Omega}$  – угловая скорость прецессии восходящего узла орбиты, обусловленная влиянием нецентральности гравитационного поля Земли, которая приближенно может быть определена по формуле

$$\dot{\Omega} = \frac{3\pi}{T_{\text{др}}} \frac{\pi_2}{\mu p^2} \cos i, \quad (7)$$

где  $\pi_2$  – постоянная, учитывающая полярное сжатие Земли;

$p$  – фокальный параметр орбиты.

Анализ зависимости (6) показывает, что влияние  $\dot{\Omega}$  на  $T_{\text{эф}}$  в рамках выполнения поставленной задачи несущественно (так, например, при высоте круговой орбиты КА  $H=300$  км и

$i=70^\circ$  значение  $\dot{\Omega}$  составляет примерно 0,18 градусов за виток). Полагаем, что маневр по переводу КА на новую рабочую орбиту будет выполнен за половину витка КА вокруг Земли, что для данной высоты КА составляет примерно 45 мин. Тогда величина ухода восходящего узла орбиты для данного интервала времени составит примерно 0,09 градусов (что соответствует расстоянию примерно в 10 км на линии экватора).

Таким образом, для расчета  $T_{\text{эф}}$  значением  $\dot{\Omega}$  при выполнении маневра по переводу КА с исходной на новую рабочую орбиту можно пренебречь. Следовательно,

$$T_{\text{эф}} \cong \frac{2\pi}{\omega_3}. \quad (8)$$

Если положить, что значение драконического периода обращения КА  $T_{\text{др}}$  несущественно отличается от значения периода обращения КА при движении по невозмущенной орбите  $T$  [3], тогда можно принять:

$$T_{\text{др}} \cong T = 2\pi \frac{a^{3/2}}{\sqrt{\mu}}. \quad (9)$$

Каждой орбите будет соответствовать свое значение периодичности замыкания трассы  $Q$ . К примеру, на рис.1 отображена зависимость периодичности замыкания трассы  $Q$  от большой полуоси  $a$ .

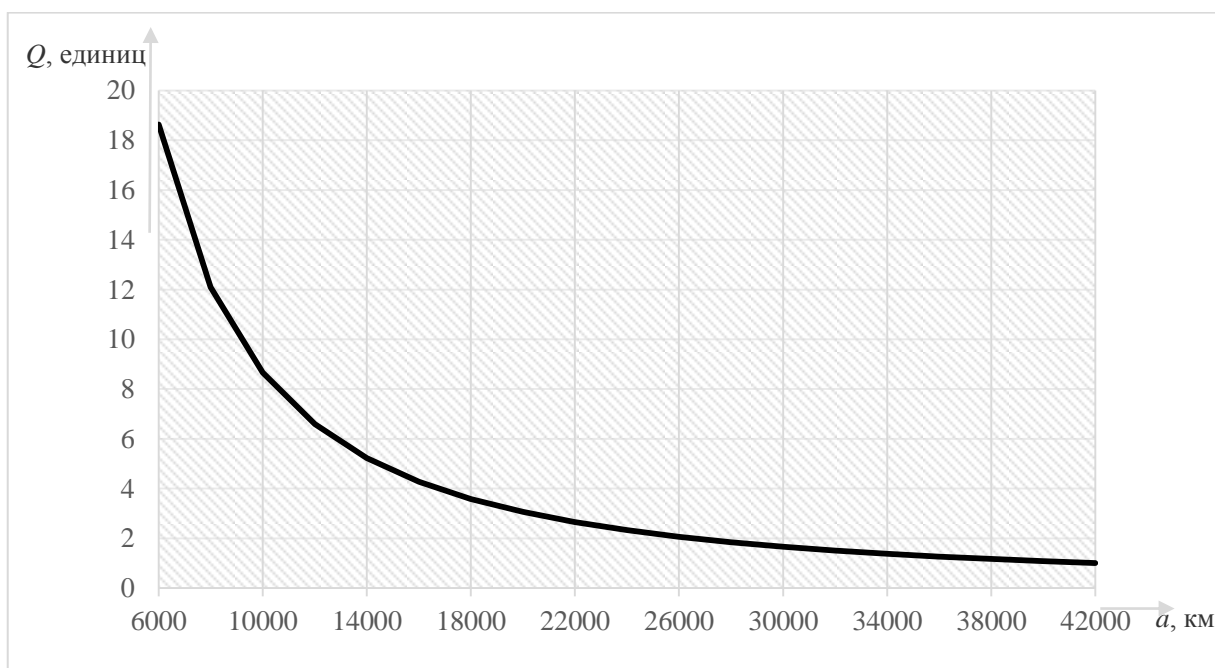


Рис.1. Зависимость периодичности замыкания трассы  $Q$  от большой полуоси  $a$

В соответствии с формулами (8) и (9),  $T_{\text{эф}}$  является, по предположению, постоянной величиной, а  $T_{\text{др}}$  зависит только от большой полуоси  $a$ . Обозначим драконический период обращения КА  $T_{\text{др}}$  исходной и новой рабочей орбит соответственно  $T_{\text{др}0}$  и  $T_{\text{др}1}$ , тогда выражение для расчета периодичности замыкания трассы исходной и новой рабочей орбит можно записать:

$$Q_0 = \frac{T_{\text{эф}}}{T_{\text{др}0}}, \quad (10)$$



$$Q_1 = \frac{T_{\text{эф}}}{T_{\text{др1}}}. \quad (11)$$

Основным параметром, характеризующим энергетические затраты КА на выполнение маневра, являются затраты характеристической скорости  $\Delta V_{\Sigma}$ . Так как энергетика орбиты (сумма кинетической и потенциальной энергии) КА однозначно связана с большой полуосью орбиты [5], то можно записать, что

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_{\Sigma}(a_0, a_1), \quad (12)$$

где  $a_0$  – большая полуось исходной орбиты;

$a_1$  – большая полуось новой рабочей орбиты.

В соответствии с формулами (10) и (11), периодичность замыкания трассы исходной орбиты  $Q_0$  зависит от большой полуоси исходной орбиты  $a_0$ , а периодичность замыкания трассы новой рабочей орбиты  $Q_1$  – от большой полуоси новой рабочей орбиты  $a_1$ .

Таким образом, существует зависимость  $\Delta V_{\Sigma}$  от  $Q_0$  и  $Q_1$ :

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_{\Sigma}(a_0, a_1) \equiv \Delta V_{\Sigma}(Q_0, Q_1). \quad (13)$$

Это означает, что, зная только периодичность замыкания трасс исходной и новой рабочей орбит  $Q_0$ , и  $Q_1$ , можно однозначно определить характеристическую скорость  $\Delta V_{\Sigma}$ , требуемую для совершения маневра по переходу с исходной на новую рабочую орбиту.

В качестве примера можно рассмотреть двухимпульсную схему перелета между компланарными круговыми орбитами с радиусами  $r_0$  и  $r_1$ . Для круговых орбит значение  $Q_0$  будет зависеть от радиуса исходной орбиты  $r_0$ , а значение  $Q_1$  – от радиуса новой рабочей орбиты  $r_1$ . С учетом этого выражение (13) запишем следующим образом:

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_{\Sigma}(r_0, r_1) \equiv \Delta V_{\Sigma}(Q_0, Q_1). \quad (14)$$

Для расчета характеристической скорости перелета между компланарными круговыми орбитами с радиусами  $r_0$  и  $r_1$  можно воспользоваться известными формулами [6]:

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_0 + \Delta V_1, \quad (15)$$

$$\Delta V_0 = \left| \sqrt{\frac{\mu}{r_0}} \left( \sqrt{\frac{2r_1}{r_0 + r_1}} - 1 \right) \right|, \quad (16)$$

$$\Delta V_1 = \left| \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \left( 1 - \sqrt{\frac{2r_0}{r_0 + r_1}} \right) \right|, \quad (17)$$

$$\Delta V_{\Sigma} = \left| \sqrt{\frac{\mu}{r_0}} \left( \sqrt{\frac{2r_1}{r_0 + r_1}} - 1 \right) \right| + \left| \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} \left( 1 - \sqrt{\frac{2r_0}{r_0 + r_1}} \right) \right|. \quad (18)$$

Используя формулы (8)–(11), определим  $Q_0$  и  $Q_1$ :

$$Q_0 = \frac{\frac{2\pi}{\omega_3}}{2\pi \frac{r_0^{3/2}}{\sqrt{\mu}}} = \frac{\sqrt{\mu}}{\omega_3 r_0^{3/2}}, \quad (19)$$

$$Q_1 = \frac{\sqrt{\mu}}{\omega_3 r_1^{3/2}}. \quad (20)$$

Выразим  $r_0$  и  $r_1$  как зависимость соответственно от  $Q_0$  и  $Q_1$ :

$$r_0 = \left( \frac{\sqrt{\mu}}{\omega_3 Q_0} \right)^{2/3}, \quad (21)$$

$$r_1 = \left( \frac{\sqrt{\mu}}{\omega_3 Q_1} \right)^{2/3}. \quad (22)$$

Подставляя формулы (21) и (22) в выражение (18), окончательно получим зависимость  $\Delta V_\Sigma$  через  $Q_0$  и  $Q_1$ :

$$\Delta V_\Sigma = \left| \sqrt[3]{\mu \omega_3 Q_0} \left( \frac{\sqrt{2} \cdot Q_0^{1/3}}{\sqrt{Q_0^{2/3} + Q_1^{2/3}}} - 1 \right) \right| + \left| \sqrt[3]{\mu \omega_3 Q_1} \left( 1 - \frac{\sqrt{2} \cdot Q_1^{1/3}}{\sqrt{Q_0^{2/3} + Q_1^{2/3}}} \right) \right|. \quad (23)$$

Таким образом, для определения суммарной характеристической скорости, требуемой для совершения маневра по переводу КА с одной квазисинхронной орбиты на другую квазисинхронную орбиту, нет необходимости знать параметры этих орбит, достаточно знать периодичность замыкания трассы КА.

### АЛГОРИТМ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАТРАТ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ НА СОВЕРШЕНИЕ МАНЕВРА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЫКАНИЯ ОРБИТ

Значение  $Q_0$  известно по условию задачи. Значение  $Q_1$  неизвестно, однако  $Q_1 = \frac{n_1}{m_1}$ . При

этом целое количество суток  $m_1$  квазисинхронной орбиты по условиям задачи соответствует количеству суток  $m_{\text{зад}}$ , требуемому для наблюдения заданного района. Можно записать:

$$m_1 = m_{\text{зад}}. \quad (24)$$

С учетом соотношения (24) величина характеристической скорости в выражении (23) зависит только от количества витков  $n_1$ , совершаемых за количество суток  $m_{\text{зад}}$ . Условиям решения задачи будут соответствовать равенства  $m_1 = m$ , где  $m=1, \dots, m_{\text{зад}}$ .

Таким образом, алгоритм для расчета затрат характеристической скорости перелета КА с исходной на новую рабочую квазисинхронную орбиту для обеспечения наблюдения заданного района не реже одного раза в  $m_{\text{зад}}$  суток будет выглядеть следующим образом.

1. Определение принадлежности исходной круговой орбиты КА диапазону суточных квазисинхронных орбит  $Q_0 \in \{Q_{0\min}; Q_{0\max}\}$  соответствующему диапазону высот  $H_0 \in \{H_{0\min}; H_{0\max}\}$ , где  $Q_{0\min}$  – суточная квазисинхронная орбита, являющаяся верхней границей диапазона –  $Q_{0\min} = [Q_0]$ , а  $Q_{0\max}$  – суточная квазисинхронная орбита, являющаяся нижней границей диапазона –  $Q_{0\max} = [Q_0] + 1$  (здесь  $[Q_0]$  – целая часть числа  $Q_0$ ). Значение периодичности замыкания трассы  $Q_1$  новой рабочей орбиты из соображения минимизации характеристической скорости не может выйти за пределы  $Q_{0\min}$  и  $Q_{0\max}$ :

$$Q_{0\min} \leq Q_1 \leq Q_{0\max}.$$

2. Определение количества витков ( $n_1$ ), совершаемых КА на новой рабочей орбите с высотой  $H_{\max}$ , соответствующее верхней границе диапазона суточных квазисинхронных орбит  $Q_{0\min}$ :

$$\frac{n_1}{1} = Q_1.$$

3. Определение квазисинхронных орбит, удовлетворяющих условию  $1 \leq m_1 \leq m_{\text{зад}}$  и находящихся в пределах диапазона суточных квазисинхронных орбит  $Q_0 \in \{Q_{0\text{min}}; Q_{0\text{max}}\}$  по следующим соотношениям:

– при  $m_1 = 1$ :  $Q_1 = \frac{n_1}{1}, Q_1 = \frac{n_1}{1} + 1$ ;

– при  $m_1 = 2$ :  $Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{1}{2}$ ;

– при  $m_1 = 3$ :  $Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{1}{3}; Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{2}{3}$ ;

– при  $m_1 = 4$ :  $Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{1}{4}; Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{3}{4}$ ;

– при  $m_1 = 5$ :  $Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{1}{5}; Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{2}{5}; Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{3}{5}; Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{4}{5}; Q_1 = \frac{n_1}{1} + \frac{5}{5}$  и т.д.

В результате существуют несколько вариантов решения задачи перелета с исходной орбиты на различные новые рабочие квазисинхронные орбиты с различными характеристиками по наблюдению заданного района.

4. Вычисление по выражению (23) значений  $\Delta V_{\Sigma}$  для каждой из квазисинхронной орбит из п. 3 данного алгоритма.

5. Определение функционала  $J = \min_{m=n_{\text{зад}}} \Delta V_{\Sigma}(Q_1, m)$  для поиска квазисинхронных орбит, удовлетворяющих условиям задачи.

В последующем можно определить необходимые параметры новой рабочей орбиты  $Q_1$ , зная значение периодичности ее замыкания.

График зависимости затрат характеристической скорости  $\Delta V_{\Sigma}$  от разницы периодичностей замыкания трасс  $|Q_0 - Q_1|$  на примере КА «Целина А-52» представлен на рис.2.

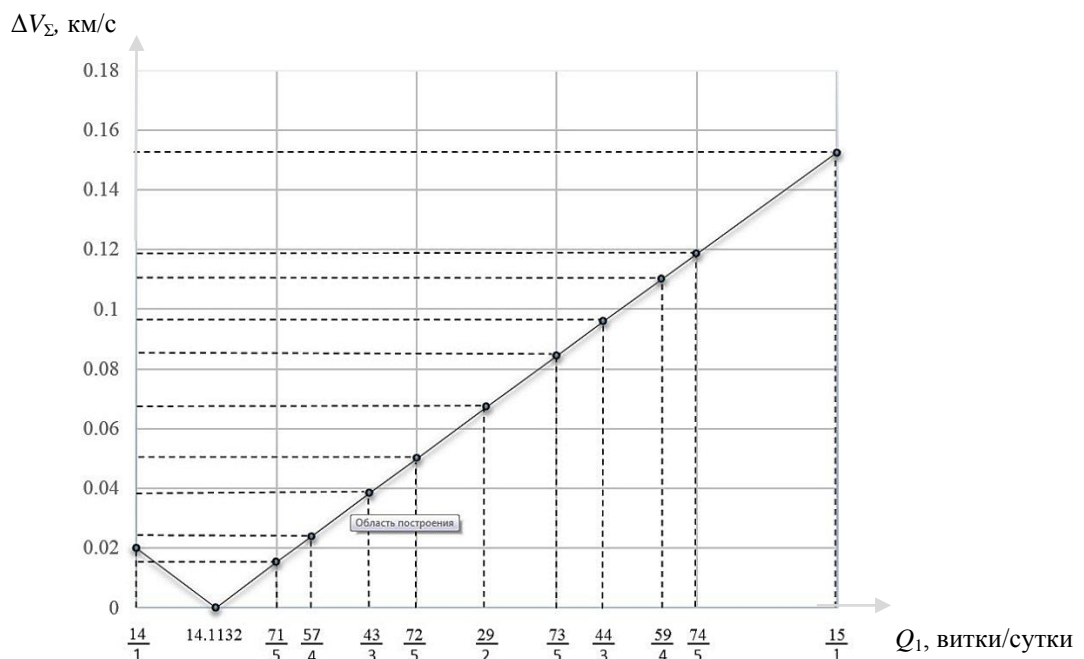


Рис.2. Зависимость затрат характеристической скорости  $\Delta V_{\Sigma}$  от разницы периодичностей замыкания трасс  $|Q_0 - Q_1|$  на примере КА «Целина А-52» ( $H=850,22$  км;  $Q=14,1132$ )

Характер зависимостей затрат суммарной характеристической скорости  $\Delta V_{\Sigma}$  от разницы периодичностей замыкания трасс  $|Q_0 - Q_1|$  для  $Q_0=13,14$ ;  $Q_0=13,38$ ;  $Q_0=13,71$  представлен на рис.3.

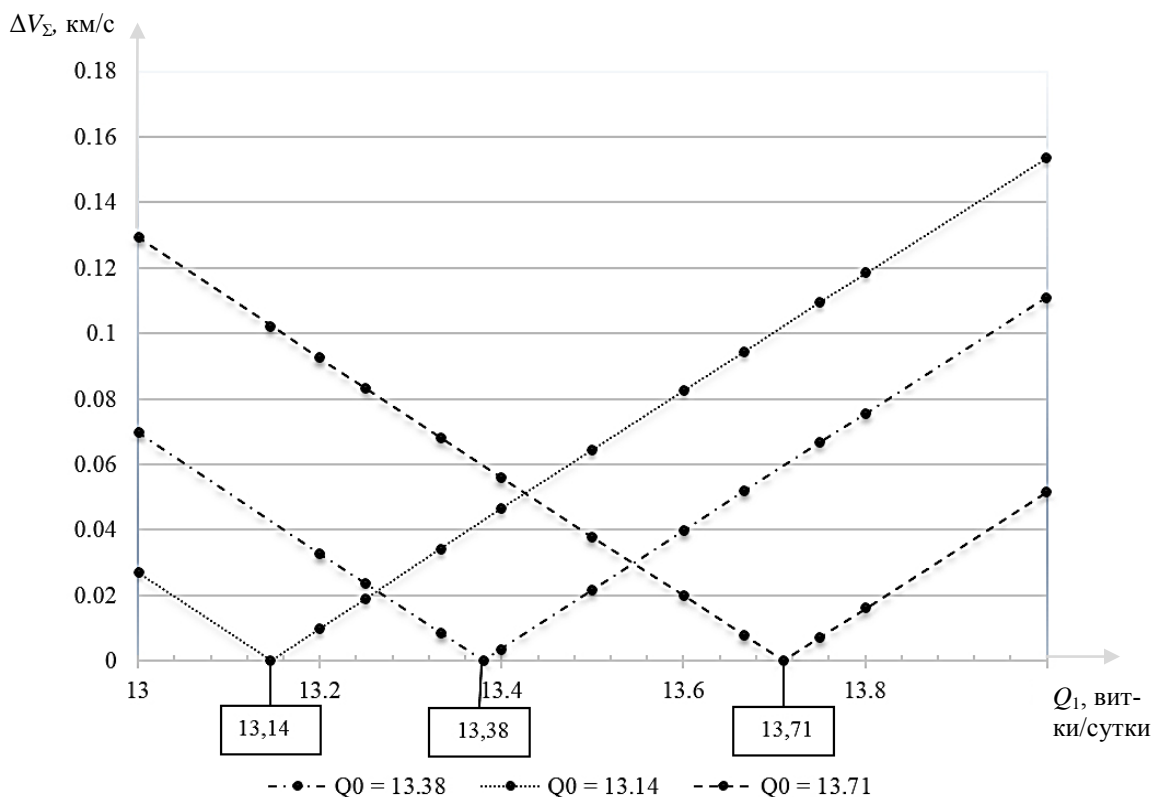


Рис. 3. Характер зависимостей затрат характеристической скорости  $\Delta V_{\Sigma}$  от разницы периодичностей замыкания трасс  $|Q_0 - Q_1|$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что существует аналитическая зависимость между затратами характеристической скорости  $\Delta V_{\Sigma}$ , требуемой для перелета КА с исходной на новую рабочую квазисинхронную орбиту, и периодичностью замыкания их трассы. При этом возможно определить такую новую рабочую квазисинхронную орбиту, которая будет удовлетворять требованиям заказчика по периодичности наблюдения заданного района и по затратам характеристической скорости на маневр КА.

Таким образом, для перелета с исходной на новую рабочую орбиту для выполнения задачи наблюдения конкретного района предложен алгоритм, который позволяет определить параметры квазисинхронной орбиты КА, на которую целесообразно переводить КА, и соответствующие затраты характеристической скорости для совершения маневра.

## Список используемых источников

1. Основы теории полета летательных аппаратов: учеб. пособие / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Богачев, С.А. Власов и др. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 242 с.
2. Маневрирование космическим аппаратом с целью улучшения характеристик наблюдения района поверхности Земли / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Власов, В.В. Салов, В.В. Киселев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 10. – С.798–803.

3. *Власов С.А., Мамон П.А.* Теория полета космических аппаратов: учеб. пособие – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2007. – 435 с.

4. Модификация баллистической структуры орбитальной группировки космических аппаратов на основе принципа оптимального управления / Н.Ф. Аверкиев, В.В. Салов, А.Т. Жаткин, В.В. Киселев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2004. – Т. 57, № 7. – С.23–25.

5. *Аверкиев Н.Ф.* Оперативный поиск резервных орбит при управлении движением средств выведения космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 2. – С.10–15.

6. *Салов В.В., Жаткин А.Т.* Алгоритм расчета энергомассовых характеристик космического аппарата, предназначенного для выполнения инспекции космических объектов // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. – Вып. 27. – С.316–322.

А.И. Авсеенко,  
кандидат техн. наук, доцент;  
С.А. Дорофеев,  
кандидат техн. наук  
Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Калининград;  
О.Р. Кивчун,  
кандидат техн. наук;  
Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Калининград;

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ**

В статье рассматриваются подходы к формированию концептуальной модели управления электропотреблением крупных энергетических комплексов на основе оценки потенциала энергосбережения, с учетом динамики изменения электропотребления и влияющих на него факторов. В данном подходе впервые введено понятие динамических свойств потенциала энергосбережения и рассмотрена трехуровневая структура оценки потенциала энергосбережения с учетом ключевых факторов, влияющих на электропотребление.

Ключевые слова: потенциал энергосбережения, динамические свойства потенциала энергосбережения, доверительный интервал, ZP-нормирование, ZP-нормы электропотребления, лидинговый параметр.

В современных условиях энергосбережение является одной из важнейших тем исследований экономически развитых стран мира. Разработанные в этих странах национальные целевые программы экономии энергоресурсов охватывают обширный комплекс мероприятий, включающий правовое урегулирование отношений в области энергосбережения, организационные мероприятия, совершенствование технологий потребления энергоносителей, использование вторичного сырья и возобновляемых источников энергии, разработку систем контроля и учета энергопотребления.

Для внедрения на любом объекте, вне зависимости от его принадлежности к сектору экономики, энергосберегающих технологий и замены оборудования на более энергоэффективное необходимо оценить возможности по снижению электропотребления – потенциал энергосбережения. Это позволит при определении объема инвестиций, направленных на повышение эффективности использования энергоресурсов, сопоставить затраты с величиной прибыли, предполагаемой за счет экономии электроэнергии. Таким образом, рассматривая в качестве энергоресурсов электроэнергию, под *потенциалом энергосбережения* понимается величина возможного снижения электропотребления без нарушений технологического процесса на объекте.

Существующие подходы к оценке потенциала энергосбережения можно условно разделить на две группы: классические и техноценологические. Классические подходы основаны на сравнении фактического электропотребления объекта и некоего эталонного, которое определяется по параметрам отдельных типов агрегатов (установок), особенностям технологического процесса или технологической цепочки типового объекта, которые распространяются на все объекты. При техноценологическом подходе все объекты рассматриваются в виде системы, техноценоза, под которым понимается ограниченная в пространстве и времени совокупность объектов, объединенных слабыми связями, но имеющих единую систему управления и всестороннего обеспечения, а также общую цель функционирования [1]. Техноценозом может быть регион, город, крупное предприятие, группировка войск и т.п. [2]. Главным до-

стоинством техноценологического подхода является то, что учитываются системные свойства исследуемого инфраструктурного объекта (техноценоза) [2].

В рамках техноценологической теории [1, 2], созданной профессором Б.И. Кудриным, научной школой под руководством профессора В.И. Гнатюка разработана методика оптимального управления электропотреблением техноценоза [3]. Одной из процедур методики является процедура потенцирования [4–6], заключающаяся в определении величины потенциала энергосбережения, на величину которого на данном временном интервале может быть сокращено электропотребление техноценоза без ущерба нормальному функционированию его объектов. Таким образом, *потенциал энергосбережения* – полученная на расчетную глубину абсолютная разница между электропотреблением техноценоза, без реализации энергосберегающих мероприятий, и электропотреблением, полученным при управляющем воздействии, направленном на энергосбережение (рис.1) [6].

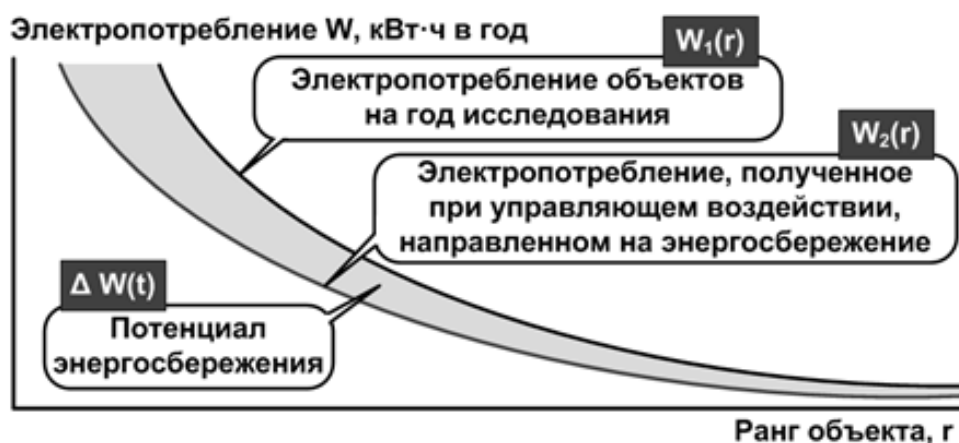


Рис. 1. Потенциал энергосбережения техноценоза

Расчет потенциала энергосбережения осуществляется по выражению [3]

$$\Delta W_t = \int_0^{\infty} W_1(r) dr - \int_0^{\infty} W_2(r) dr \quad (1)$$

Структура концептуальной модели управления электропотреблением объектов техноценологического типа на основе потенциала энергосбережения показана на рис. 2.

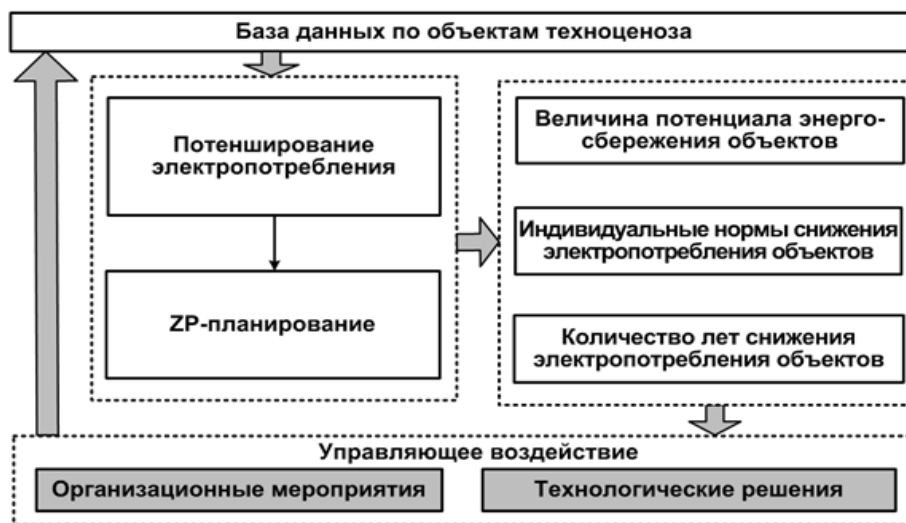


Рис. 2. Структура концептуальной модели управления электропотреблением на основе потенциала энергосбережения

Недостатками подхода к оценке потенциала энергосбережения, представленного на рис.2, является невозможность учета изменения параметров электропотребления и функциональных особенностей каждого объекта во времени, а также факторов и степени их влияния на эти изменения. Для устранения указанных недостатков и повышения точности расчета при оценке потенциала энергосбережения необходимо производить анализ динамики изменения во времени электропотребления с учетом основных влияющих факторов. Данный подход предполагает введение понятия *динамических свойств потенциала энергосбережения*, под которыми понимается наличие трех уровней потенциала, учитывающих особенности изменения во времени потребления электроэнергии объектов техноценоза и соответствующие факторы его определяющих:

- первый уровень – Z1-потенциал (системный) – учитывает системные ограничения по электропотреблению;
- второй уровень – Z2-потенциал (объектный) – учитывает лучшие организационные и технологические решения, доступные для техноценоза;
- третий уровень – Z3-потенциал (нормированный) – учитывает лучшие энергоэффективные технологические решения уровня мировых образцов.

Таким образом, процедура оценки потенциала энергосбережения включает трехуровневую структуру определения возможной величины снижения электропотребления без ущерба нормальному функционированию техноценоза в целом и каждому объекту в частности, с учетом доступных лучших энергоэффективных организационных и технологических решений и в зависимости от основных факторов, влияющих на электропотребление (рис. 3).

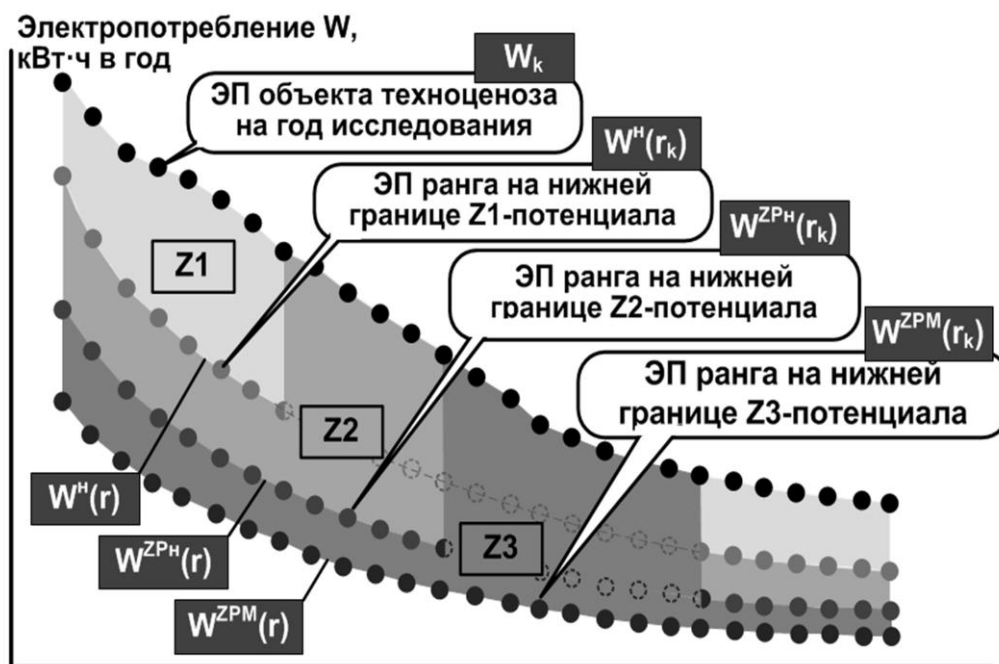


Рис. 3. К понятию «динамические свойства потенциала энергосбережения техноценоза»:

$W^H(r)$  – нижняя граница переменного доверительного интервала;

$W^H(r)$  – нижняя граница переменного доверительного интервала;

$W^{ZH}(r)$  – нижняя граница переменного доверительного интервала

Для оценки Z1, Z2 и Z3 потенциалов энергосбережения необходимо определить ключевые факторы, влияющие на электропотребление каждого объекта и техноценоза в целом. Как наиболее важные можно выделить основные группы факторов: организационные (планиро-





где  $\Delta W_1^r(t)$  – Z1-потенциал энергосбережения  $k$ -го объекта в  $r$ -ранге за временной интервал  $t$ ;  
 $W_n^r$  – электропотребление  $r$ -ранга в  $n$ -м году наблюдения.

В результате расчет Z1-потенциала энергосбережения осуществляется по выражению [6]:

$$\Delta W_1 = \sum_{k=1}^{k_{\max}} W_k - \sum_{r=1}^{r_{\max}} W^H(r_k), \quad (6)$$

где  $W_k$  – электропотребление объектов ( $k$  – код объекта,  $k=1,2,3\dots k_{\max}$ );  
 $W^H(r_k)$  – значение электропотребления ранга  $k$ -го объекта на нижней границе ПДИ.

Второй уровень – Z2-потенциал – позволяет оценить возможности по снижению потребления электроэнергии с учетом лучших организационных и технологических решений, доступных для объектов на данном временном интервале, и определяется нижней границей ПДИ (ZP-интервал), полученной в результате интервального оценивания после ZP-нормирования [7]. Процедура ZP-нормирования позволяет пересчитать потребление электроэнергии объектов внутри функциональных групп техноценоза на основе существующих лучших внутригрупповых показателей электропотребления. Z2-потенциал учитывает динамику изменения состава основного оборудования, режимов его работы и особенностей эксплуатации на временных интервалах всей предыстории наблюдения:

$$\Delta W_2^r(t) = f(AL_r^k(t), C^k(t)), \quad (7)$$

где  $\Delta W_2^r(t)$  – Z2-потенциал энергосбережения  $k$ -го объекта в  $r$ -ранге за временной интервал  $t$ .

На первом этапе ZP-нормирования объекты в зависимости от предназначения и решаемых задач объединяются в функциональные группы (ФГ) [6, 7]. Объекты одной ФГ имеют однотипный состав основного оборудования и соответственно решают одинаковые задачи. В каждой группе определяется лидинговый параметр [6, 7], описывающий основное свойство входящих в нее объектов, который показывает, для чего эксплуатируется установленное на объекте оборудование (примеры лидинговых параметров: лечебные учреждения – койко-место; предприятия – объем выпускаемой продукции и т.д). Далее для каждого объекта за весь период наблюдения рассчитывается удельное электропотребление по выражению [7]

$$C_n^k = W_{kn} / L_{kn}, \quad (8)$$

где  $C_n^k$  – удельное электропотребление  $k$ -го объекта в  $n$ -м году;  
 $W_{kn}$  – электропотребление  $k$ -го объекта в  $n$ -м году;

$L_{kn}$  – лидинговый параметр  $k$ -го объекта в  $n$ -м году.

Полученные значения удельного электропотребления объектов являются показателями эффективности внедрения управленческих решений по энергосбережению за расчетный временной интервал. В каждой ФГ за весь период наблюдения для каждого временного интервала выбирается минимальное значение удельного электропотребления, по значению которого рассчитываются ZP-нормы электропотребления объектов согласно выражению [7]

$$W_{kn}^{ZP} = C_{p_n, \min}^k \times L_{kn}, \quad (9)$$

где  $W_{kn}^{ZP}$  – ZP-норма электропотребления  $k$ -го объекта в  $n$ -м году;  
 $C_{p_n, \min}^k$  – наименьшее значение удельного электропотребления в  $p$ -й ФГ в  $n$ -м году.

Расчитанные ZP-нормы электропотребления объектов всех ФГ для каждого временного интервала ранжируются в порядке убывания, и для каждого временного интервала формируется вектор рангового параметрического распределения [6]:

$$\left. \begin{array}{l} \{(W_{1l}^{ZP}, r=1); (W_{2l}^{ZP}, r=2); (W_{3l}^{ZP}, r=3) \dots (W_{kl}^{ZP}, r=k)\} \\ \dots \\ \{(W_{1n}^{ZP}, r=1); (W_{2n}^{ZP}, r=2); (W_{3n}^{ZP}, r=3) \dots (W_{kn}^{ZP}, r=k)\} \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Для полученных  $ZP$ -норм электропотребления строится новый ПДИ ( $ZP$ -интервал), нижняя граница  $W^{ZPn}(r)$  которого определяет величину  $Z2$ -потенциала. Расчет  $Z2$ -потенциала энергосбережения осуществляется по выражению [7]

$$\Delta W_2 = \sum_{k=1}^{k_{\max}} W_k - \sum_{r=1}^{r_{\max}} W^{ZPn}(r_k). \quad (11)$$

Третий уровень –  $Z3$ -потенциал – позволяет оценить возможности по снижению потребления электроэнергии с учетом лучших энергоэффективных технологических решений реально существующих мировых образцов, доступных для объектов в настоящее время [6, 7].  $Z3$ -потенциал определяется нижней границей ПДИ, полученной при интервальном оценивании после процедуры  $ZP$ -нормирования, но при этом пересчет электропотребления объектов внутри функциональных групп по выражению (9) осуществляется на основе удельных показателей лучших мировых образцов [7]. Далее для каждого временного интервала рассчитанные  $ZPM$ -норм электропотребления объектов ранжируются в порядке убывания, и формируется вектор рангового параметрического распределения аналогично выражению (10).

Для полученных  $ZPM$ -норм электропотребления строится ПДИ ( $ZPM$ -интервал), нижняя граница  $W^{ZPM}(r)$  которого определяет величину  $Z3$ -потенциала. Расчет  $Z3$ -потенциала энергосбережения осуществляется по выражению [7]

$$\Delta W_3 = \sum_{k=1}^{k_{\max}} W_k - \sum_{r=1}^{r_{\max}} W^{ZPM}(r_k). \quad (12)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотренная процедура потенцирования на основе понятия динамических свойств потенциала энергосбережения позволяет оценить возможности по энергосбережению с учетом изменения электропотребления и влияния основных факторов на всей предыстории наблюдения и включает три этапа:

*первый этап* – оценка  $Z1$ -потенциала энергосбережения – реализуется принятием управленческих решений, направленных на осуществление организационных мероприятий – соблюдения требований руководящих документов по эксплуатации электроустановок, ГОСТов, технической документации, графиков нагрузок, культуры использования электроприборов;

*второй этап* – оценка  $Z2$ -потенциала энергосбережения – реализуется внедрением лучших технологических решений, связанных с модернизацией оборудования объектов с учетом анализа лучших показателей энергоэффективности, доступных для данного техноценоза без ущерба их нормальному функционированию;

*третий этап* – оценка  $Z3$ -потенциала энергосбережения – реализуется внедрением технологических решений на основе показателей энергоэффективности лучших реально существующих мировых образцов.

Планомерная реализация потенциала энергосбережения позволит своевременно скорректировать управленческие решения и не приведет к нарушению технологического процесса функционирования объектов и всего техноценоза.

### Список используемых источников

1. *Кудрин Б.И.* Выделение и описание электрических ценозов // Изв. вузов. Электромеханика. – № 7. – 1985. – С.18–28.
2. *Гнатюк В.И.* Закон оптимального построения техноценозов: монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калининград: КИЦ «Техноценоз», 2014. – URL: <http://gnatukvi.ru/ind.html> (дата обращения 16.05.2017).
3. *Гнатюк В.И., Луценко Д.В.* Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. – М.: Изд-во ИПП РАН, 2013. – 107 с.
4. Методика мониторинга электропотребления электротехнического комплекса Калининградской области / В.И. Гнатюк, Д.В. Луценко, О.Р. Кивчун, В.Н. Васильев // Промышленная энергетика. – 2015. – Вып. № 3. – С.26–35.
5. Потенцирование в методике управления электропотреблением техноценоза / В.И. Гнатюк, Д.В. Луценко, О.Р. Кивчун, Л.В. Примак // Механизация строительства. – 2014. – № 8. – С.19–27.
6. *Гнатюк В.И.* Потенциал энергосбережения техноценоза. – Калининград: КИЦ «Техноценоз», 2013. – URL: <http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf> (дата обращения 16.05.2017).
7. *Гнатюк В.И., Дорофеев С.А., Дюндик П.А.* Технологический подход к оценке потенциала энергосбережения // Федоровские чтения. XLV Международная научно-практическая конференция (Москва, 11–13 ноября 2015 г.). – М.: Изд-во МЭИ, 2015. – С.156–163.

С.А. Беляев,

*кандидат техн. наук, доцент*

АО «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета»;

Ю.В. Миронов,

*доктор техн. наук, доцент*

акционерное общество «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета»;

Ю.Б. Остапченко,

*кандидат техн. наук*

акционерное общество «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета»;

А.В. Экало,

*доктор техн. наук, профессор*

акционерное общество «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета»

## **АППРОКСИМАЦИЯ ПРОГРАММЫ УГЛА ТАНГАЖА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ ПРИ ПОЛЕТЕ С ЗАДАНЫМИ КОНЕЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

В рамках создания учебного программного комплекса моделирования пусков баллистических ракет рассматривается аппроксимационный способ определения программы тангажа, которая обеспечивает попадание в точку с заданными координатами и заданный угол входа в атмосферу. Исходными данными являются тестовые параметры движения баллистических ракет при полете на фиксированную дальность. Эти параметры аппроксимируются на характерных участках полиномами различной степени. Произвольно заданные в ограниченных интервалах конечные условия полета обеспечиваются выбором соответствующих коэффициентов полиномов угла тангажа и расчетом требуемого азимута пуска. Подход является приемлемым для обучающих моделирующих комплексов, не требующих высокой точности расчетов.

Ключевые слова: аппроксимация, моделирующий комплекс, программа угла тангажа.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время на всех этапах проектирования и отработки баллистических ракет (БР) и их систем управления важное место отводится математическому моделированию процессов их функционирования. Математическое моделирование этих процессов с учетом всех особенностей объекта и внешней среды, в которой предполагается его использование, является наиболее эффективным подходом, обеспечивающим необходимую точность и надежность решения целевых задач проектирования.

В зависимости от постановки задачи в рамках излагаемой технологии могут изучаться вопросы анализа влияния возмущающих факторов на точность решения целевой задачи, анализа точности решения целевой задачи, анализа допустимых траекторий полета БР, проектирования схем комплексирования, наведения и системы управления, статистического моделирования возмущенного движения БР и т.д.

Однако к настоящему моменту не существует каких-либо универсальных моделирующих комплексов, позволяющих исследовать процессы функционирования различных типов БР и их бортовых систем. Поэтому при реализации каждого проекта создаются индивидуальные моделирующие комплексы и стенды с уникальным программно-математическим обеспечением. Как правило, они являются весьма сложными с точки зрения разработки и имеют большую стоимость.

В то же время на практике существует необходимость разработки менее затратных моделирующих комплексов, которые не требуют высокой точности расчетов и позволяют проводить анализ пусков БР на качественном уровне. Такие комплексы, как правило, применяются при проведении так называемых «электронных» пусков в целях обучения специалистов, эксплуатирующих изделия ракетной техники, а также для визуализации пусков.

Одним из важных вопросов при разработке таких моделирующих комплексов является расчет программ управления движением БР, которые могут обеспечить моделирование пуска БР с произвольно заданными (в допустимых пределах) конечными условиями, а именно – произвольно заданными дальностью полета, углом и скоростью входа в атмосферу. Методики расчета этих параметров являются уникальными не только для каждого типа БР, но и при определенных условиях – для каждого испытательного пуска изделий одного типа. Поэтому представляет интерес разработка упрощенного и в определенной степени «универсального» способа определения программы угла тангажа, который может быть использован в обучающих программных комплексах моделирования пусков БР различного типа. Этому вопросу и посвящена данная работа.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГРАММЫ УГЛА ТАНГАЖА**

В основе способа определения программы тангажа лежат принятые допущения и предварительный анализ имеющихся параметров движения БР на активном участке траектории (АУТ) для фиксированных конечных условий пуска.

Для упрощения анализа возможности аппроксимации программы управления угловыми параметрами принимается допущение о том, что полет проходит в плоскости стрельбы, т.е. программа по углу рыскания и крена отсутствует. Таким образом, задача сводится к определению только программы угла тангажа.

На основе предварительного анализа параметров движения БР на АУТ программа угла тангажа разбивается на характерные временные участки его изменения, каждый из которых аппроксимируется, например, степенными полиномами соответствующей степени.

Уточнение программы тангажа для обеспечения заданных конечных условий пуска достигается за счет вариации коэффициентов полиномов угла тангажа на различных участках полета БР для различных ступеней.

Таким образом, аппроксимационный способ определения программы угла тангажа включает следующие этапы:

1. Предварительный анализ исходных параметров движения для фиксированных конечных условий пуска.
2. Уточнение коэффициентов полинома угла тангажа численными методами, обеспечивающих заданные конечные условия пуска.

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

На данном этапе решаются задачи, с помощью которых обеспечивается в дальнейшем удовлетворительная по точности аппроксимация программы угла тангажа с точки зрения выполнения произвольных (в пределах ограничений) конечных условий пуска. В частности, проводится разбиение временного интервала пуска на подынтервалы, для которых затем определяются соответствующие степенные полиномы, аппроксимирующие изменения различных параметров движения БР.

Исходными данными для определения программы управления БР по углу тангажа являются параметры движения БР при фиксированных конечных условиях. В их состав входят: текущее время полета БР на АУТ, соответствующие значения тяги двигательной установки (ДУ) каждой ступени, значения текущего веса БР и угла тангажа.

Значения тяги ДУ и веса БР, как правило, приводятся в табличном виде с некоторой дискретностью по времени. Причем шаг по времени для разных типов БР и для разных ступеней может отличаться от 1 до 10 и более секунд. Кроме того, величина шага в окрестности характерных точек активного участка, соответствующих циклограмме полета, может составлять доли секунды. Это обстоятельство делает неудобным дальнейшее использование исходных табличных данных в интересах моделирования полета (интегрирования дифференциальных уравнений движения БР на АУТ).

Таким образом, первой задачей предварительного этапа анализа исходных данных являются определение числа и уточнение границ временных интервалов, соответствующих характерным точкам изменения угла тангажа, веса БР, тяги ДУ, а также характерным точкам циклограммы полета (рис. 1).

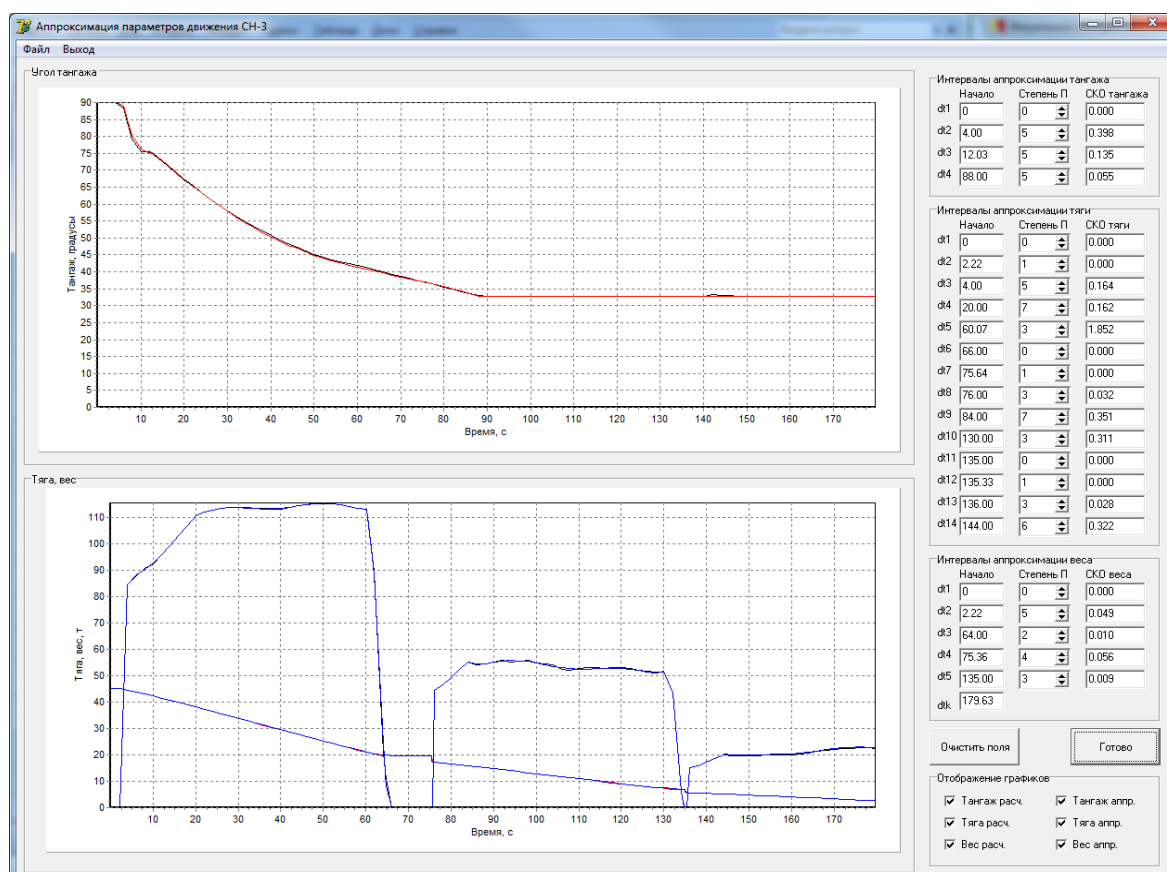


Рис. 1. Определение числа и уточнение границ временных интервалов, соответствующих характерным точкам изменения угла тангажа, веса БР и тяги ДУ

На рис.1 показан пример определения числа и границ временных интервалов, соответствующих характерным точкам изменения угла тангажа, веса БР, тяги ДУ для трехступенчатого БР на основе базовой (тестовой) траектории движения БР на АУТ при полете на фиксированную дальность. Интервал АУТ разбит на четыре подынтервала для угла тангажа, на 14 – для тяги ДУ и на пять – для веса БР.

Для каждого временного интервала выбирается соответствующий степенной полином. Степень полинома определяется оператором и контролируется среднеквадратическим откло-

нением отклонений аппроксимированных параметров от параметров, подлежащих аппроксимации (базовых) на каждом временном интервале. На графиках рис.1 приводятся результаты аппроксимации тангажа, тяги ДУ и веса БР. Аппроксимация проводилась с помощью степенных полиномов методом наименьших квадратов [1].

Полученные коэффициенты полиномов являются исходными данными для определения программы угла тангажа при пуске БР с произвольно заданными конечными условиями.

Кроме того, на этапе предварительного анализа решаются следующие задачи:

- проверка базовых параметров пуска на максимальную или немаксимальную дальность;
- определение типа базовой траектории – настильная или навесная;
- определение рациональной степени полиномов для каждого параметра движения, который подвергается аппроксимации на каждом временном интервале;
- определение диапазонов изменения коэффициентов полинома угла тангажа на каждом из участков полета БР, обеспечивающих наиболее близкие к заданным конечные условия.

Особенностью является тот факт, что структура изменения параметров тяги ДУ и массы БР остается неизменной по сравнению с соответствующими базовыми параметрами.

### **УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМА УГЛА ТАНГАЖА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННЫЕ КОНЕЧНЫЕ УСЛОВИЯ ПУСКА**

На данном этапе происходит непосредственное определение таких коэффициентов полиномов, аппроксимирующих программу угла тангажа, которые при исходной структуре изменения тяги ДУ и веса конструкции БР обеспечивают при моделировании пуска новые (заданные оператором) конечные условия пуска – координаты точки падения, угол и скорость входа в атмосферу.

Исходными данными являются коэффициенты полиномов, полученные в п.2.

Уточнение программы тангажа, т.е. коэффициентов полиномов угла тангажа, проводится методом последовательных приближений в два цикла (внешний и внутренний циклы).

На внутреннем цикле уточняются коэффициенты, обеспечивающие заданную дальность полета. Численные исследования показали, что для решения данной задачи достаточно проварьировать коэффициенты полиномов угла тангажа для первой степени БР.

На внешнем – уточняются коэффициенты, обеспечивающие заданный угол и скорость входа в атмосферу. При этом коэффициенты угла тангажа для первой степени остаются фиксированными, а уточнению подлежат коэффициенты для второй и/или третьей степени. Попутно определяется требуемый азимут пуска.

На каждой итерации расчета моделирование пуска БР проводится путем интегрирования дифференциальных уравнений движения БР [2]. При этом значения тяги ДУ и веса БР на АУТ для текущего момента времени полета вычисляются с помощью соответствующих полиномов, полученных на предварительном этапе анализа исходных данных в п.2.

В ходе интегрирования вычисляются значения скорости, угла входа в атмосферу и дальности полета, соответствующие текущей итерации расчета. Они сравниваются с требуемыми.

Поскольку параметры, характеризующие конечные условия пуска оказываются весьма чувствительными к изменению коэффициентов полиномов угла тангажа, то и на внутреннем, и на внешнем цикле решение краевой задачи целесообразно проводить методом половинного деления, который для данного класса задач гарантирует надежную сходимость.

Циклический процесс продолжается до тех пор, пока одновременно не выполняются условия близости расчетных значений конечных условий пуска к требуемым.

На рис.2 показана визуализация траекторий БР, рассчитанных по изложенной методике расчета программы тангажа для различных точек падения.



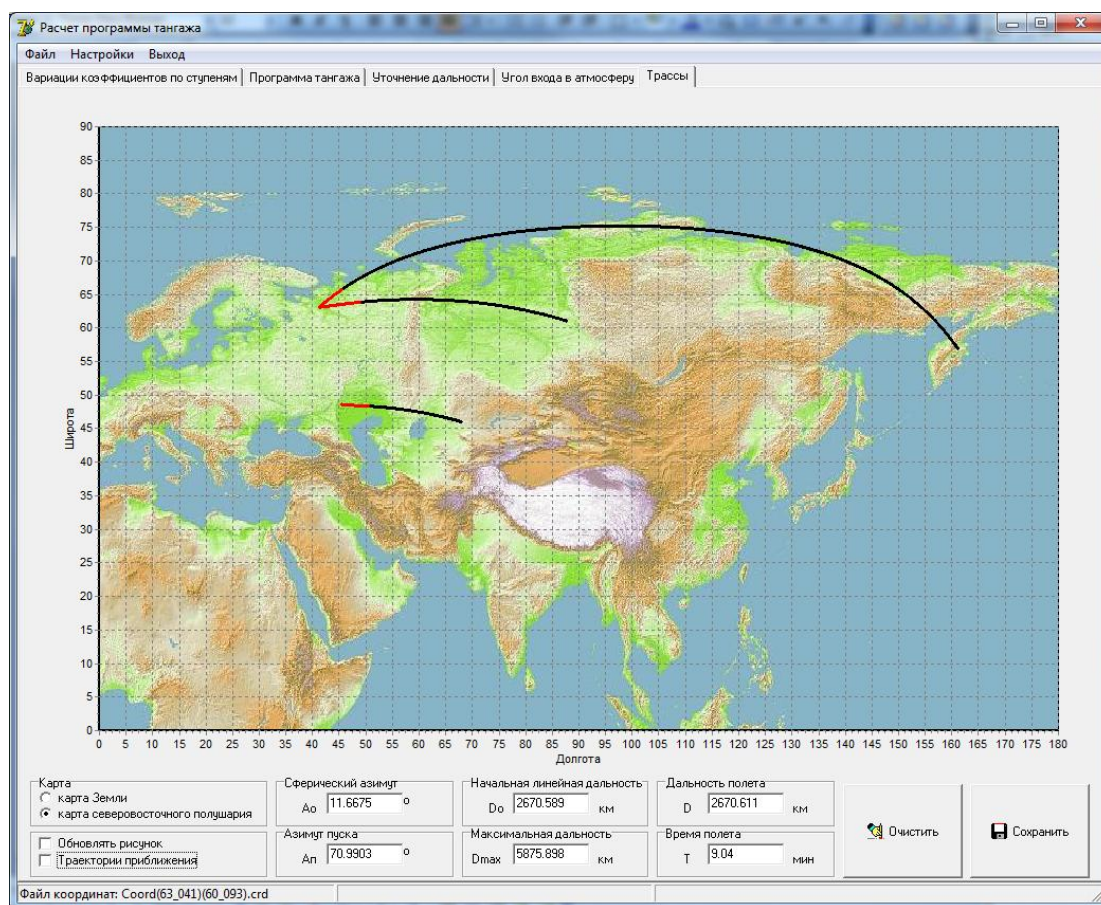


Рис. 2. Визуализация траекторий БР, рассчитанных для различных точек падения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В практике создания моделирующих программных комплексов пусков БР востребованы как сложные моделирующие стенды, использующиеся на всех этапах проектирования и отработки ракетной техники, являющиеся уникальными для каждого изделия, так и упрощенные учебно-тренировочные комплексы.

Одной из важных задач при разработке учебных моделирующих комплексов является задача определения программы угла тангажа для произвольно заданных конечных условий пуска. В данной работе рассмотрен способ определения такой программы на основе аппроксимации степенными полиномами параметров движения БР на АУТ, известных для пуска при фиксированных конечных условиях. Этот способ не требует больших вычислительных затрат и позволяет обеспечить выполнение заданных конечных условий пуска в широком диапазоне их изменений.

### Список используемых источников

1. Корн Г., Корн Т.С. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – 4-е изд. – М.: Наука, 1977. – 830 с.
2. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 407 с.

А.В. Вилков;  
 Д.Г. Колесов,  
*кандидат военных наук;*  
 А.Ф. Найданов,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ПОЗИЦИОННОГО РАЙОНА

В статье представлен методический подход, позволяющий обосновать технический облик системы радиационного наблюдения позиционного района, основанный на теории эффективности военно-технических систем. Произведена оценка показателей эффективности для различных вариантов построения системы радиационного наблюдения позиционного района.

Ключевые слова: военно-техническая система, достоверность, оперативность, полнота, радиационное наблюдение, система, эффективность.

### ВВЕДЕНИЕ

Возможность повышения эффективности ведения радиационного наблюдения (РН), обусловленная развитием автоматизированных систем управления и робототехнических комплексов, а также необходимость исключения (минимизации) прямого контакта химиков-разведчиков с зонами радиоактивного заражения определяют актуальность обоснования технического облика системы РН отдельного типового позиционного района (ПР).

### ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Исходя из цели РН основным показателем эффективности выполнения данного мероприятия должна быть вероятность своевременного обнаружения, т.е.  $P_t(t \leq t_{зад}) \rightarrow 1$ , где  $t_{зад}$  – время, установленное нормативными документами или приказом командира. Это критическое время, за которое осуществляется РН ПР в полном объеме. Однако такой показатель приемлем для оценки эффективности выполнения самого мероприятия РН. Для военно-технической системы (ВТС), которой в перспективе должна являться система РН (ее структурная схема представлена на рис. 1), необходимо вводить ряд других показателей, характеризующих эффективность ее функционирования.

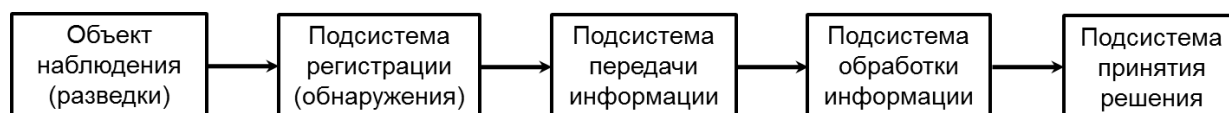


Рис. 1. Система радиационного наблюдения

В военной науке при оценке эффективности функционирования ВТС наиболее часто используются следующие показатели: полнота; достоверность; оперативность [1].

Под полнотой РН предлагаем понимать объем получаемой информации об уровнях радиации с площади, охватываемой наблюдением  $S_{изм}$ , по отношению ко всей площади позиционного района  $S_{пр}$ :

$$P_{\text{РН}} = \frac{S_{\text{изм}}}{S_{\text{пр}}} \cdot P_x(x_{\text{min}} < x < x_{\text{max}}) \cdot P_{\text{ТН}} \cdot P_{\text{ж}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $P_x(x_{\text{min}} < x < x_{\text{max}})$  – вероятность того, что измеряемая величина  $x$  лежит в пределах измерения прибора ( $x_{\text{min}} < x < x_{\text{max}}$ );

$P_{\text{ТН}}$  – показатель технической надежности элементов системы;

$P_{\text{ж}}$  – показатель живучести элементов системы.

Площадь  $S_{\text{изм}}$ , охватываемая наблюдением, зависит от способа наблюдения и качества средств измерения и ограничивается стоимостным (ресурсным) показателем  $C$ . Поэтому, для каждого способа РН необходимо решать оптимизационную задачу:  $P_{\text{РН}} \rightarrow \max, C \rightarrow \min$ .

Следующий частный показатель полноты РН – вероятность того, что измеренная величина лежит в пределах измерения прибора ( $x_{\text{min}}, x_{\text{max}}$ ). Она находится по формуле

$$P_x = \int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} \varphi_x(x) dx, \quad (2)$$

где  $\varphi_x$  – плотность распределения физической величины  $x$ . При равномерном ее распределении в диапазоне от фонового  $x_{\text{ф}}$  до максимально возможной  $x_{\text{возм}}$ , при которой имеет смысл РН, плотность распределения примет вид

$$\varphi_x(x) = \frac{1}{x_{\text{возм}} - x_{\text{ф}}}. \quad (3)$$

С учетом этого

$$P_x(x_{\text{min}} \leq x \leq x_{\text{max}}) = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{x_{\text{возм}} - x_{\text{ф}}}. \quad (4)$$

Однако  $x_{\text{min}}$  и  $x_{\text{ф}}$  – величины очень маленькие по сравнению с  $x_{\text{возм}}$  и  $x_{\text{max}}$ . Для того чтобы учесть их, необходимо использовать логарифмический масштаб. Перепишем выражение (4) в следующем виде:

$$P_x(x_{\text{min}} \leq x \leq x_{\text{max}}) = \frac{\lg(x_{\text{max}}) - \lg(x_{\text{min}})}{\lg(x_{\text{возм}}) - \lg(x_{\text{ф}})} = \frac{\lg(\frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}})}{\lg(\frac{x_{\text{возм}}}{x_{\text{ф}}})}. \quad (5)$$

Обоснуем величину  $x_{\text{возм}}$ . С учетом ослабления ионизирующего излучения физической защитой, например корпусом боевой машины ( $K_{\text{осл}} = 10$ ), для набора смертельной дозы в перерасчете на открытую местность она составит 10000 рад/ч. Фоновое значение возьмем минимальное  $x_{\text{ф}} = 10$  мкрад/ч. Тогда

$$P_x = 0,11 \cdot \lg(\frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}}). \quad (6)$$

Техническая надежность элементов системы является внутренним показателем каждого средства измерения, его носителя, средств обработки и передачи информации. Для основной массы технических средств данный показатель стремится к 1. Поэтому при оценочных расчетах его можно не учитывать.

В отличие от технической надежности, показатель живучести при сравнении различных способов РН имеет большую значимость. В полном виде его можно записать так:

$$P_{\text{ж}} = P_{\text{ж}}^{\text{СИ}} \cdot P_{\text{ж}}^{\text{НСИ}} \cdot P_{\text{ж}}^{\text{КС}} \cdot P_{\text{ж}}^{\text{ЛС}}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{ж}}^{\text{СИ}}$  – показатель живучести средства измерения (СИ);  
 $P_{\text{ж}}^{\text{НСИ}}$  – показатель живучести носителя СИ;  
 $P_{\text{ж}}^{\text{КС}}$  – показатель живучести канала связи;  
 $P_{\text{ж}}^{\text{ЛС}}$  – показатель живучести личного состава.

В зависимости от способа ведения РН формулу (7) можно упростить. При проведении РН с непосредственным участием химиков-разведчиков на объекте наблюдения (пешим способом или на машине) основной вклад вносит живучесть личного состава. В свою очередь, живучесть носителя СИ, особенно беспилотного летательного аппарата (БЛА), меньше, чем живучесть СИ, т.е.  $P_{\text{ж}}^{\text{СИ}} > P_{\text{ж}}^{\text{НСИ}} > P_{\text{ж}}^{\text{ЛС}}$ . Таким образом, показатель живучести пешего способа РН будет определяться живучестью личного состава. Данное утверждение также справедливо, если личный состав находится внутри машины разведки.

Средство измерения, как одно из основных элементов подсистемы регистрации (обнаружения), является неотъемлемой составляющей системы РН любого исполнения. Показатель живучести средств измерения зависит от свойств самого прибора, и поэтому при определении наиболее эффективного способа РН данный показатель можно считать одинаковым.

Канал связи может быть проводным и беспроводным, оценка его живучести зависит от его исполнения:

- 1) для проводной связи – типы линий (заглубленные, наземные, воздушные);
- 2) для беспроводной – типы связи (защищенная/незащищенная, цифровая/аналоговая).

Основными поражающими факторами для канала связи являются ударная волна, электромагнитный импульс, средства радиоэлектронной борьбы противника. Анализ уязвимостей показывает, что наибольшей живучестью будет обладать проводной заглубленный канал связи.

Таким образом, оценка живучести того или иного облика системы РН должна основываться в первую очередь на вербальном подходе, при котором из представленного набора показателей живучести применяют только те, которые имеют большую значимость для соответствующей модели технического облика системы РН.

Под достоверностью будем понимать степень приближения измерительной информации к фактической. Для отдельного средства измерения данный показатель определяется совокупностью его погрешностей: инструментальной, методической, динамической и фоновой [2]. Для цифровых приборов добавляется погрешность дискретизации.

Совокупность погрешностей выражается в виде среднеквадратического отклонения  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{и}}^2 + \sigma_{\text{м}}^2 + \sigma_{\text{д}}^2 + \sigma_{\text{ц}}^2}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{\text{и}}$  – инструментальная погрешность;  
 $\sigma_{\text{м}}$  – методическая погрешность;  
 $\sigma_{\text{д}}$  – динамическая погрешность;  
 $\sigma_{\text{ц}}$  – погрешность дискретизации.

Фоновая погрешность имеет систематический характер и учитывается как детерминированная величина (заранее измеренная или прогнозируемая).

Измеряемая физическая величина относительно истинной (или ее математического ожидания) распределена, как правило, по нормальному закону с плотностью

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_{\text{д}} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_{\text{д}}^2}}, \quad (9)$$

где  $m$  – математическое ожидание физической величины;  
 $\sigma_a$  – среднеквадратическая абсолютная погрешность,  $\sigma_a = m \cdot \sigma$ ;  
 $\sigma$  – среднеквадратическая относительная погрешность.

Тогда вероятность попадания значения  $x$  в диапазон  $m - h < x < m + h$  находится через вероятностный интеграл (формулу Лапласа – Гаусса):

$$P(m - h \leq x \leq m + h) = \int_{m-h}^{m+h} \varphi(x) dx = 2\Phi_0\left(\frac{h}{\sigma_a}\right), \quad (10)$$

где  $\Phi_0$  – функция Лапласа – Гаусса.

При переходе к относительной погрешности ( $\sigma_a = m \cdot \sigma$ ) имеем

$$P(m - h \leq x \leq m + h) = 2\Phi_0\left(\frac{h}{m \cdot \sigma}\right), \quad (11)$$

Отношение  $\frac{h}{m}$  есть относительный диапазон, в пределах которого рассчитывается данная вероятность. Для того чтобы оценить средства измерения между собой, необходимо выбрать «эталонный» прибор, например ДП-5В, который имеет относительную погрешность 30%. Тогда, если примем соотношение  $\frac{h}{m} = 0,3$ , то показатель достоверности можно будет представить в виде

$$P(\sigma) = 2\Phi_0\left(\frac{0,3}{\sigma}\right). \quad (12)$$

Показатель оперативности характеризует, насколько быстрее будут производиться сбор и обработка информации по отношению к заданному времени  $t_{зад}$ :

$$\Pi_t = 1 - \frac{t_{рн}}{t_{зад}}, \quad (13)$$

где  $t_{рн}$  – время, затрачиваемое на сбор и обработку информации, которое складывается из времени готовности средств разведки и времени, затраченного на сбор информации, ее обработку и доведение:

$$t_{рн} = t_r + t_c + t_{обр} + t_d, \quad (14)$$

где  $t_r$  – время готовности средств измерения;  
 $t_c$  – время, затрачиваемое на сбор информации, т.е. передачу на пост радиационного, химического и биологического наблюдения;  
 $t_{обр}$  – время, затрачиваемое на обработку информации, т.е. ее оценку с допустимыми значениями;  
 $t_d$  – время, затрачиваемое на доведение информации командиру для принятия решения.

Время готовности средства измерения  $t_r$  есть непосредственная характеристика самого прибора и составляет несколько секунд. Для автоматизированных систем время сбора и обработки информации также составляет секунды (доли секунд). Для неавтоматизированных систем это время обусловлено человеческим фактором, так же как и доведение информации до командира, которое, как правило, осуществляется голосом.

Таким образом, для автоматизированных систем



$$t_{рн}^a \approx t_d, \quad (15)$$

а для неавтоматизированных –

$$t_{рн}^{н/а} \approx t_c + t_{обр} + t_d. \quad (16)$$

Значит, показатель оперативности количественно отражает степень своевременности обнаружения начала радиоактивного заражения, как целевой функции данного вида мероприятия.

Представленные показатели эффективности функционирования системы РН хоть и на первый взгляд являются самостоятельными, однако имеют зависимость друг от друга, определяющуюся свойствами элементов, входящих в данную систему, технические характеристики которых в той или иной степени оказывают влияние на все показатели.

Поэтому очевидным развитием представленного методического аппарата является разработка обобщающего показателя, в качестве которого, к примеру, можно рассмотреть скорость сбора и обработки информации о радиационной обстановке в ПР:

$$П_c = \frac{П_{рн}}{t_{рн}} \cdot S_{пр}. \quad (17)$$

Данный показатель характеризует количество собираемой и обрабатываемой информации с ПР в единицу времени ( $m^2/c$ ) и определяет эффективность РН, проводимого в ПР, в целом.

Используя представленный методический подход, можно оценить эффективность функционирования различных вариантов систем РН ПР.

Рассмотрим различные способы ведения РН:

- пеший – измерение носимыми средствами в контрольных точках;
- на транспорте – измерение бортовыми средствами машин разведки в контрольных точках;
- на БЛА – измерение специально разработанными средствами для БЛА на маршруте и в контрольных точках (для квадрокоптера);
- стационарный (объектовый) – при помощи стационарно размещенных детекторов в контрольных точках.

Методические основы реализации РН каждым из этих способов [3] позволяют выработать вербальную модель технического облика соответствующей системы. Результаты анализа показателей функционирования систем РН, основанных на этих вербальных моделях, представлены в табл. 1. Этот анализ показал следующее:

- показатель полноты больше у тех систем, которые обладают большими показателями надежности и живучести;
- показатель достоверности – где меньше значение совокупной погрешности;
- показатель оперативности – у автоматизированных систем.

На основе анализа живучестей всех вариантов системы РН можно сделать вывод, что наибольшей живучестью обладает система стационарных датчиков (или система объектового контроля). Живучесть такой системы при проводной заглубленной линии связи определяется живучестью датчиков и, прежде всего, по действию ударной волны (обычного взрыва или ядерного) при условии, что личный состав поста РХБ наблюдения надежно укрыт.

Таким же способом можно оценить показатель технической надежности СИ (детекторов), носителей СИ и каналов связи. Она будет наименьшей для пешего способа и объектового и обусловлена только технической надежностью СИ.

Вероятность своевременного обнаружения и передачи информации будет выше у автоматизированных систем, к которым также относится система объектового контроля. Автоматизированная система определяет и высокий уровень оперативности.

Таким образом, выяснено, что наибольшим показателем полноты обладает система объектового контроля, которая также будет не уступать другим системам по скорости обработки информации.

Таблица 1

### Анализ показателей эффективности функционирования систем РН

Технический облик системы РН (способ ведения РН)	Показатели эффективности функционирования систем РН		
	Полнота	Достоверность	Оперативность
Пеший	Определяется живучестью л/с ( $P_{ж}^{лс}$ )	Определяется инструментальной погрешностью ( $\sigma_{и}$ )	Время обнаружения от 0 до $\tau_{зад}$ часов
С использованием машины разведки	Определяется живучестью л/с ( $P_{ж}^{лс}$ )	Определяется инструментальной погрешностью ( $\sigma_{и}$ )	Время обнаружения от 0 до $\tau_{зад}$ часов
С использованием БЛА	Определяется живучестью носителя СИ ( $P_{ж}^{нси}$ )	Определяется инструментальной ( $\sigma_{и}$ ), методической ( $\sigma_{м}$ ) и динамической ( $\sigma_{д}$ ) погрешностями	Время обнаружения от 0 до $\tau_{зад}$ часов
Система стационарных датчиков	Определяется живучестью СИ ( $P_{ж}^{си}$ )	Определяется инструментальной погрешностью ( $\sigma_{и}$ )	Мгновенное обнаружение

Достоверность получаемой информации, как было сказано выше, зависит от применяемых СИ, способа ведения наблюдения и обработки информации и определяется совокупностью погрешностей. Так, *инструментальная погрешность* присуща всем средствам измерения и является их технической характеристикой.

*Методическая* – имеет большее значение для воздушных средств и связана с пересчетом мощности дозы излучения на высоту 1 м с учетом высоты полета, плотности, температуры и давления воздуха, рельефа местности и т. д.

*Динамическая* погрешность характерна для подвижных средств измерения. Наиболее высокое значение она принимает для воздушных средств разведки.

*Фоновая* – является системной погрешностью и ее значение для конкретного ПР постоянно, слабо изменяется с высотой и для больших уровней радиации – незначительно.

*Погрешность дискретизации информации* – это погрешность, обусловленная переводом аналогового сигнала в цифровой вид.

Анализ погрешностей показывает, что основной из них является инструментальная. Методическая и динамическая характерны для воздушных средств, а погрешность дискретизации – для автоматизированных систем. Если первые две соизмеримы с инструментальной, то

последняя на порядок ниже и ее можно не учитывать. Отсюда делаем вывод, что наилучшей достоверностью будет обладать система РН, основанная на применении воздушных средств (БЛА).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, на основе анализа показателей эффективности функционирования систем РН научно обосновано, что наибольшей эффективностью функционирования будет обладать система РН ПР, осуществляемая с помощью размещенных в контрольных точках детекторов с автоматизированным сбором и обработкой информации.

Проведенное научное обоснование технического облика системы РН ПР позволяет перейти от оценки ее «боевой» эффективности к «технической», при которой должен решаться ряд оптимизационных задач. Результатом решения таких задач будет являться оптимальный состав элементов данной системы, обеспечивающий наибольшие значения показателей эффективности при минимальных затратах.

## **Список используемых источников**

1. *Морозов Л.М., Петухов Г.Б., Сидоров В.Н.* Методологические основы теории эффективности. – Л.: ВИКИ, 1982. – 236 с.
2. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
3. Методические указания по организации радиационного, химического и биологического наблюдения (разведки). – М.: МО РФ, 2014. – 120 с.



А.С. Глуханов,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Е.И. Жабровец;  
В.М. Моторин,  
кандидат техн. наук, доцент;  
В.В. Пудиков,  
кандидат техн. наук

## ОЦЕНИВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗИФИЦИРОВАННЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В данной статье предлагается подход к оценке надежности и экономической эффективности газифицированных котельных установок с целью получения количественных оценок этих важных свойств.

Ключевые слова: котельные установки, надежность, безотказность, скрытые отказы, техническое обслуживание, система комплексной автоматизации, отопительный сезон, экономическая эффективность.

### ВВЕДЕНИЕ

В общем комплексе систем теплоснабжения источником теплоты являются котельные установки. *Котельной установкой* согласно [1] называется котельный агрегат совместно с горелочными, топочными тягодутьевыми устройствами, механизмами для удаления продуктов горения и использования тепловой энергии уходящих газов (экономайзерами, воздухоподогревателями и т.д.), оснащенный средствами автоматического регулирования, контроля и сигнализации процесса выработки теплоносителя заданных параметров (САУ).

Котельные установки, работающие на газообразном топливе, являются опасными производственными объектами.

Основные требования к проектированию, строительству, реконструкции, капитальному ремонту, расширению и техническому перевооружению котельных устанавливаются правилами СП 89.13330.2012 [1]. Особенностью данного нормативного документа является приоритетность требований, направленных на обеспечение надежной и безопасной эксплуатации котельных установок, а также обеспечение энергосбережения и повышение экономической эффективности систем теплоснабжения.

## ОЦЕНИВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГАЗИФИЦИРОВАННЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Выполнение этих требований предусматривает решение ряда задач, связанных с комплексной автоматизацией котельных установок, разработкой вопросов эксплуатации, технического обслуживания и обеспечения надежной и безопасной работы котельных, определением основных экономических показателей и выявлением влияния тех или иных факторов на экономическую эффективность.

Целью опубликования данной статьи является обоснование подхода к количественной оценке надежности и экономической эффективности газифицированных котельных установок.

*Надежность котельной установки* понимается в соответствии с [2] как ее свойство сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения и технического обслуживания.

С точки зрения обеспечения надежной и безопасной эксплуатации котельных установок важнейшее значение приобретает их безотказность, т.е. свойство непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции (обеспечивать нагрев теплоносителя) в течение некоторого времени (отопительного периода) в заданных режимах и условиях применения (например, без постоянного обслуживающего персонала).

Одним из показателей безотказности является *вероятность безотказной работы*, т.е. вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не возникнет [2].

С нашей точки зрения, надежность автоматизированной котельной наилучшим образом может быть охарактеризована вероятностью противоположного события – вероятностью возникновения отказа, результатом которого является нарушение работоспособного состояния котельной установки.

Согласно [2] отказ может быть полным или частичным, соответственно объект переходит в неработоспособное или частично неработоспособное состояние. Своевременно не обнаруженный даже частичный отказ может привести к переходу объекта не просто в частично неработоспособное, а в опасное состояние, когда возникает недопустимый риск причинения вреда людям, или окружающей среде, или существенных материальных потерь.

Практика эксплуатации котельных установок показывает, что возникновение такого отказа, который мы далее будем называть аварией, зависит от одновременного возникновения двух случайных событий – скрытого отказа АСУ и частичного отказа котельного агрегата.

Под скрытым отказом подразумевается отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования [3].

При частично неработоспособном состоянии объект способен выполнять одни функции и одновременно не способен выполнять другие, т.е. котельная установка продолжает работать фактически в аварийном режиме, что в любой момент может привести к аварии – механическому разрушению оборудования, взрыву, пожару и пр.

С учетом изложенного вероятность возникновения аварии  $P_a$  может быть представлена формулой

$$P_a = \int_0^T \int_0^t \varphi(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2, \quad (1)$$

где  $T$  – интервал времени между плановыми техническими обслуживаниями котельной установки (как правило, равный продолжительности отопительного сезона), ч;

$\tau_1$  – наработка АСУ до скрытого отказа, ч;

$\tau_2$  – наработка котельного агрегата до частичного отказа, ч.

Данная ситуация может быть проиллюстрирована, как показано на рис.1.

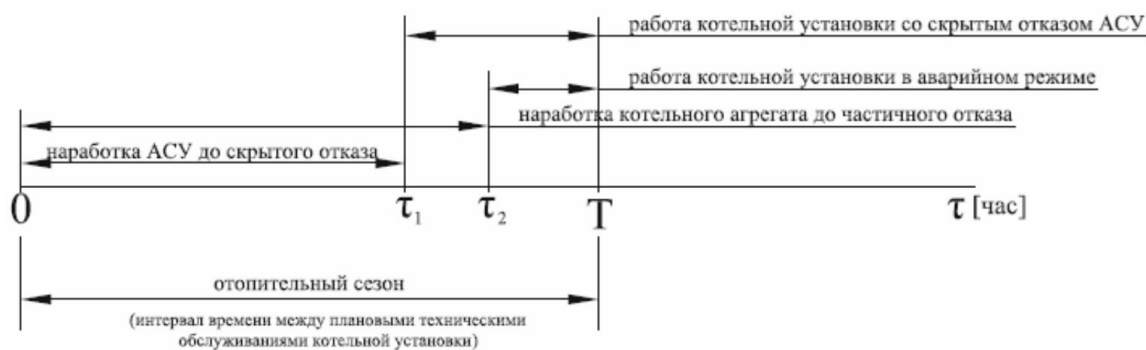


Рис.1. Распределение времени возникновения отказов котельной установки в интервале времени между плановыми техническими обслуживаниями

При значительной длительности отопительного сезона может быть принято экспоненциальное распределение времени возникновения отказов АСУ и котельных агрегатов.

В работе [4] обобщены результаты исследований по применению основных положений теории надежности в практике эксплуатации автоматизированных котельных установок.

Показано, что при сформулированных условиях формула (1) преобразуется к виду

$$P_a = e^{-\gamma ndT}(e^{-\gamma ndT} - 1) - \frac{\lambda}{\lambda + \gamma} [e^{-(\lambda + \gamma)n dT} - 1], \quad (2)$$

где  $T$  – интервал времени между плановыми техническими обслуживаниями котельной установки, ч;

$\lambda$  – интенсивность возникновения скрытых отказов АСУ, 1/ч;

$\gamma$  – интенсивность возникновения частичных отказов котельного агрегата, 1/ч;

$d$  – коэффициент использования котельных агрегатов;

$n$  – общее число котельных агрегатов в котельной.

Входящий в формулу (2) показатель  $d$  представляет собой коэффициент использования котлов, который одинаков для котельных, расположенных в местностях с близкими климатическими условиями и имеющих одинаковое число котельных агрегатов  $n$ .

Исходя из принятого определения аварии, наиболее действенным методом уменьшения вероятности возникновения аварии и, соответственно, повышения надежности является периодическое техническое обслуживание, проводимое с целью обнаружения и устранения скрытого отказа АСУ до возникновения аварии котельной установки.

Очевидно, что в течение отопительного сезона имеется некоторый вероятный интервал времени  $\Theta$ , когда скрытые отказы АСУ отсутствуют.

При экспоненциальном распределении времени возникновения скрытого отказа АСУ величина  $\Theta$  определяется выражением [4]

$$\Theta = \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T}), \quad (3)$$

а время, в течение которого котельная установка продолжает работать при необнаруженном скрытом отказе АСУ, составляет  $T - \Theta$ . С точки зрения возможности возникновения аварии опасным является именно этот промежуток времени.

Исходя из формул (2) и (3), может производиться подбор максимально допустимого времени между периодическими техническими обслуживаниями, при котором величина вероятности возникновения аварии становится столь мала, что авария может считаться практически недостоверным событием.

Решение задачи повышения эффективности работы котельных установок предполагает создание и внедрение новых систем автоматического управления, более надежных, с одной стороны, и способных оптимизировать процессы генерации теплоты – с другой.

## ОЦЕНИВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗИФИЦИРОВАННЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Для оценки экономической эффективности котельных установок предлагается использовать следующие экономические показатели.

Капитальные затраты  $C_k$  на комплексную автоматизацию котельных состоят из затрат на проектирование  $C_{пр}$ , стоимости монтажных работ  $C_{мр}$  и стоимости материалов и оборудования средств автоматики и телемеханики  $C_o$ , необходимых для комплексной автоматизации котельных [5]:

$$C_k = C_{\text{пр}} + C_{\text{мр}} + C_o \text{ [руб.]} \quad (4)$$

Ежегодные эксплуатационные затраты  $C_3$  на техническое обслуживание САУ котельных складываются из затрат на содержание эксплуатационного персонала и стоимости запасных частей  $C_{3ч}$ , устанавливаемых в процессе технического обслуживания взамен отказавших элементов автоматики:

$$C_3 = C_{3п} + C_{3ч} \text{ [руб.]} \quad (5)$$

Годовая экономия средств  $\Delta \mathcal{E}$  в результате комплексной автоматизации газифицированных отопительных котельных определяется из выражения

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{3п} + \mathcal{E}_T + \mathcal{E}_{3ч} \text{ [руб./год]}, \quad (6)$$

где  $\mathcal{E}_{3п}$  – годовая экономия фонда заработной платы эксплуатационного персонала за счет увеличения интервала времени между техническими обслуживаниями;

$\mathcal{E}_T$  – годовая экономия средств за счет снижения расхода топлива;

$\mathcal{E}_{3ч}$  – годовая экономия средств за счет сокращения потребности в запасных частях для замены отказавших элементов автоматики.

Срок окупаемости  $\Delta W$  капитальных затрат на внедрение новых систем автоматического управления, более надежных и экономически эффективных, определяется из следующего соотношения:

$$\Delta W = \frac{C_k}{\Delta \mathcal{E}} \text{ [год]}. \quad (7)$$

Полученные по формулам (1)–(7) количественные показатели надежности и экономической эффективности котельных установок могут быть использованы при оценке фактического технического состояния действующих котельных, при формировании технического задания на разработку перспективных систем, при технико-экономическом обосновании альтернативных новых проектных решений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной статье подход к оценке надежности и экономической эффективности газифицированных котельных установок позволяет получить количественные оценки этих важных свойств.

Показано, что надежность автоматизированной котельной наилучшим образом может быть количественно оценена вероятностью возникновения отказа, результатом которого является нарушение работоспособного состояния котельной установки.

Для оценки экономической эффективности котельных установок предлагается использовать следующие экономические показатели:

- капитальные и эксплуатационные затраты;
- экономию средств, полученную в результате комплексной автоматизации;
- срок окупаемости капитальных затрат на внедрение новых систем автоматического управления.

**Список используемых источников**

1. СП 89.13330.2012. Котельные установки. – М.: Минрегион России, 2012. – 94 с.
2. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
3. ГОСТ 27.310–95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. – М.: Стандартинформ, 1995. – 152 с.
4. *Соколов Б.А.* Котельные установки и их эксплуатация: учебник. – М.: Академия, 2007. – 432 с.
5. *Брюханов О.Н., Кузнецов В.А.* Газифицированные котельные агрегаты: учебник. – М.: Инфра-М, 2012. – 400 с.

П.С. Гончаров,  
*кандидат техн. наук;*  
А.М. Денисов,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
Л.П. Зозуля,  
*кандидат техн. наук;*  
И.С. Прохватова

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И ПЕРЕГРУЗКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В РЕЗУЛЬТАТЕ СТОЛКНОВЕНИЯ С ЧАСТИЦЕЙ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

Приведен один из вариантов методики расчета изменения угловой скорости и перегрузки космического аппарата, возникающих в результате его столкновения с частицей космического мусора.

Ключевые слова: космический мусор, ударный импульс, угловая скорость, космический аппарат, перегрузка.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных вредных факторов возрастающего антропогенного загрязнения околоземного космического пространства является ударное воздействие частиц (фрагментов), верхних ступеней ракет-носителей, отработавших космических аппаратов (КА) и других орбитальных средств, нередко объединяемых общим понятием – «космический мусор».

Для КА, функционирующих на часто используемых типовых орбитах, одним из наиболее вероятных сценариев их повреждения будет столкновение с частицами космического мусора (ЧКМ), движущимися в близких к попутным направлениях. Так, для низких околополярных орбит наибольшее количество столкновений КА с ЧКМ прогнозируется для углов сближения, находящихся в диапазоне  $15\text{--}20^\circ$  [1], что соответствует скоростям встречи  $1800\text{--}2500$  м/с.

Особую опасность представляют твердые ЧКМ, не наблюдаемые существующими и создаваемыми оптическими и радиолокационными средствами, но имеющие достаточные для пробития элементов конструкции КА размеры (ориентировочно от 0,5 до 50 мм).

Существенным проблемным вопросом в данном случае является идентификация воздействия, позволяющая своевременно выявить повреждение (отличить его от других неисправностей) и принять меры по возможному восстановлению работоспособности КА. Одним из способов определения места и параметров воздействия ЧКМ является использование возникающих при столкновении возмущающих ускорений центра масс и относительно центра масс.

Расчетно-экспериментальная методика определения ударной силы и продолжительности ее действия, возникающей при типовых столкновениях, достаточно подробно изложена в работе [2]. В настоящей статье представлено развитие этого научно-методического аппарата в направлении разработки методики оценивания изменения угловых скоростей и перегрузок КА в результате столкновения с ЧКМ.

Анализ характеристик элементов конструкции КА и условий их пробития твердой частицей показывает, что один из типовых случаев воздействия будет описываться следующими условиями:

- ударник – частица диаметром  $1\text{--}10$  мм, имеющая скорость подлета до  $2500$  м/с;
- преграда – подкрепленная пластина (обечайка) толщиной  $2\text{--}3$  мм с расстоянием между элементами силового набора  $50\text{--}200$  мм.

Следует отметить, что при данном сочетании параметров пробитие преград – элементов конструкции КА – будет реализовываться преимущественно посредством механизма адиабатического сдвига [2, 3].

Таким образом, при решении задачи КА считается твердым свободным телом. Исходными данными являются массовые и динамические характеристики соударяемых объектов. Линия действия мгновенной ударной силы в общем случае не проходит через центр масс КА.

Положение точки удара (рис. 1) определяется радиусом-вектором  $\vec{r}$  и двумя углами  $\beta \in [0; 2\pi]$  и  $\gamma \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ , а направление ударной силы (ударного импульса  $\vec{S}$ ) – углами  $\alpha \in [0; 2\pi]$  и  $\delta \in [\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ .

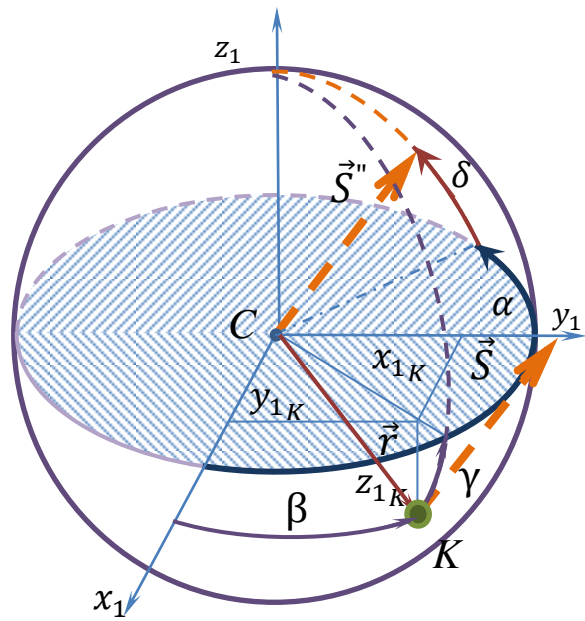


Рис. 1. К определению проекций вектора ударного импульса

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ СИЛЫ

Для определения угловой скорости КА, приобретаемой им в результате столкновения с ЧКМ, используется основное уравнение теории удара (рис. 2). Далее, в зависимости от решаемой задачи целесообразно рассматривать два типа моделей воздействия ЧКМ.

Модели первого типа базируются на классических методах теоретической механики и применяются для определения изменения скоростей при ударе. Модели второго типа основаны на результатах расчетно-экспериментальных исследований взаимодействия ударников с различными преградами [2–4] и до скоростей столкновения 2800–3000 м/с применяются при оценивании стойкости преград к ударному воздействию с определенными допущениями, учитывающими потери на плавление. Исходными данными для таких моделей являются параметры конструкции КА (толщина обечайки, тип конструкционного материала и т.п.).

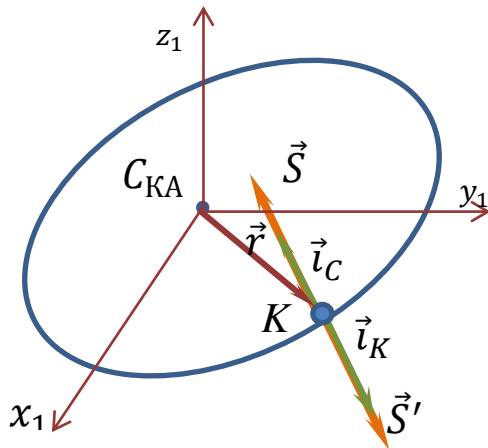


Рис. 2. Удар двух объектов

В моделях первого типа используются основные теоремы динамики при ударе [5, 6]. Итак, в соответствии с теоремами об изменении количества движения и о движении центра масс справедливы соотношения:

– для частицы космического мусора, представленной материальной точкой,

$$m \cdot (\vec{V}_K - \vec{v}_K) = S \cdot \vec{i}_K; \tag{1}$$

– для центра масс КА

$$M_{КА} \cdot (\vec{V}_C - \vec{v}_C) = S \cdot \vec{i}_C, \tag{2}$$

где  $K$  – точка контакта;  
 $M_{КА}$  – масса КА;  
 $\vec{i}_C$  – орг вектора  $\vec{S}$ ;  
 $\vec{i}_K$  – единичный вектор, противоположный вектору  $\vec{i}_C$ ;  
 $m$  – масса ЧКМ;  
 $\vec{v}_K$  и  $\vec{V}_K$  – векторы скорости ЧКМ в начале и конце удара соответственно;  
 $\vec{v}_C$  и  $\vec{V}_C$  – векторы скорости центра масс КА в начале и конце удара соответственно.

При этом изменение момента количеств относительного движения КА  $\Delta\vec{K}_C^r$  в начале и конце удара в соответствии с теоремой определяется из выражения

$$\Delta\vec{K}_C^r = (\vec{r} \times \vec{i}_C) \cdot S, \quad (3)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор, определяющий положение точки соударения относительно связанной системы координат (ССК).

Проекции векторного уравнения (3) на оси ССК имеют вид:

$$\begin{aligned} I_{x_1} \cdot \Delta\omega_{x_1} &= S \cdot \lambda_{x_1}; \\ I_{y_1} \cdot \Delta\omega_{y_1} &= S \cdot \lambda_{y_1}; \\ I_{z_1} \cdot \Delta\omega_{z_1} &= S \cdot \lambda_{z_1}. \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I_{x_1}$  – момент инерции КА относительно оси;  
 $I_{y_1}$  – момент инерции КА относительно оси  $y_1$ ;  
 $I_{z_1}$  – момент инерции КА относительно оси  $z_1$ ;  
 $\lambda_{x_1}, \lambda_{y_1}, \lambda_{z_1}$  – проекции вектора  $\vec{\lambda} = \vec{r} \times \vec{i}_C$  на оси ССК.

Скорости точки контакта, принадлежащей КА, в соответствии с формулами кинематики будут определяться следующими выражениями:

– до удара

$$\vec{u} = \vec{v}_C + \vec{\omega} \times \vec{r};$$

– после удара

$$\vec{U} = \vec{V}_C + \vec{\Omega} \times \vec{r},$$

где  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{\Omega}$  – векторы угловой скорости КА до и после удара соответственно.

Разность векторов  $\vec{U}$  и  $\vec{u}$  определяется как

$$\vec{U} - \vec{u} = (\vec{V}_C - \vec{v}_C) + \Delta\vec{\omega} \times \vec{r}. \quad (5)$$

После умножения скалярно на  $\vec{i}_C$  равенство (5) преобразуется к виду



$$(\vec{U} - \vec{u}) \cdot \vec{i}_C = (\vec{V}_C - \vec{v}_C) \cdot \vec{i}_C + (\vec{r} \times \vec{i}_C) \Delta \vec{\omega}.$$

Скалярное произведение выражения (2) на  $\vec{i}_C$  составляет

$$(\vec{V}_C - \vec{v}_C) \cdot \vec{i}_C = \frac{S}{M_{КА}},$$

и с учетом вышеприведенных выкладок равенство (5) принимает вид

$$(\vec{U} - \vec{u}) \cdot \vec{i}_C = \frac{S}{M_{КА}} + \lambda_{x_1} \cdot \Delta \omega_{x_1} + \lambda_{y_1} \cdot \Delta \omega_{y_1} + \lambda_{z_1} \cdot \Delta \omega_{z_1}. \quad (6)$$

При упругом ударе скорость ЧКМ после удара –  $\vec{V}_K$ . После умножения скалярно на  $\vec{i}_K$  равенство (1) преобразуется к виду

$$(\vec{V}_K - \vec{v}_K) \cdot \vec{i}_K = \frac{S}{m}. \quad (7)$$

После преобразований можно получить:

$$\vec{U} \cdot \vec{i}_C + \vec{V}_K \cdot \vec{i}_K - (\vec{u} \cdot \vec{i}_C + \vec{v}_K \cdot \vec{i}_K) = \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M_{КА}} + \frac{\lambda_{x_1}^2}{I_{x_1}} + \frac{\lambda_{y_1}^2}{I_{y_1}} + \frac{\lambda_{z_1}^2}{I_{z_1}} \right) \cdot S. \quad (8)$$

Как известно, величина ударного импульса, возникающего при соударении тел, зависит не только от их масс и скоростей до удара, но и от физико-механических свойств соударяющихся тел. Эти свойства характеризуются величиной, называемой коэффициентом восстановления  $\varepsilon$ . При этом, если  $0 < \varepsilon < 1$  – удар является не вполне упругим или просто упругим; если  $\varepsilon = 1$  – удар называется абсолютно упругим; если  $\varepsilon = 0$  – абсолютно неупругим.

В соответствии с гипотезой Ньютона скорости КА и ЧКМ до и после удара связаны соотношением

$$\vec{U} \cdot \vec{i}_C + \vec{V}_K \cdot \vec{i}_K = -\varepsilon \cdot (\vec{u} \cdot \vec{i}_C + \vec{v}_K \cdot \vec{i}_K),$$

с учетом которого выражение (8) принимает вид

$$S = -\frac{1+\varepsilon}{D} \cdot (\vec{u} \cdot \vec{i}_C + \vec{v}_K \cdot \vec{i}_K) = \frac{1+\varepsilon}{D} \cdot u_r,$$

где  $u_r = -(\vec{u} \cdot \vec{i}_C + \vec{v}_K \cdot \vec{i}_K)$  – проекция относительной скорости точки контакта КА относитель-

но контакта ЧКМ на нормаль  $\vec{i}_K$  [7],  $D = \frac{1}{m} + \frac{1}{M_{КА}} + \frac{\lambda_{x_1}^2}{I_{x_1}} + \frac{\lambda_{y_1}^2}{I_{y_1}} + \frac{\lambda_{z_1}^2}{I_{z_1}}$ .

Отсюда следует, что

$$S = \frac{1+\varepsilon}{D} \cdot u_r.$$

На практике большинство ударов ЧКМ будут близки к абсолютно неупругим [2, 3], соответственно скорость ЧКМ и точки контакта КА можно принять одинаковыми:  $\vec{V}_K = \vec{U}$ .

Следовательно,

$$\vec{U} \cdot \vec{i}_C + \vec{U} \cdot \vec{i}_K - (\vec{u} \cdot \vec{i}_C + \vec{v}_K \cdot \vec{i}_K) = D \cdot S.$$

Величина ударного импульса при этом

$$S = \frac{u_r}{D}.$$

Как упоминалось ранее, для случаев, когда параметры конструкции КА известны, целесообразно применение расчетно-экспериментальной модели, позволяющей на основе экспериментальных данных определять тип взаимодействия – застревание ЧКМ в преграде или пробитие, а также скорость ЧКМ и выбитую ей из обечайки «пробку» [2–4].

При этом ударный импульс определяется выражением

$$\vec{S} = \int_0^{\Delta\tau} \vec{F} \cdot dt = \vec{F}_{cp} \cdot \Delta\tau. \quad (9)$$

В последней формуле введены следующие обозначения:  $\Delta\tau$  – продолжительность удара;  $\vec{F}$  – вектор мгновенной ударной силы,  $\vec{F}_{cp}$  – вектор средней ударной силы, определяемые с использованием известных значений толщины преграды и скорости ударника по методике из работы [2].

Наиболее вероятный сценарий воздействия ЧКМ на конструкцию КА в данном случае будет представлять последовательность пробитий ее элементов со ступенчатым уменьшением скорости.

Пользуясь скалярными равенствами (4), можно определить проекции вектора угловой скорости и скорости движения центра масс КА в конце удара на оси связанной системы координат:

$$\begin{aligned} \Omega_{x_1} &= \omega_{x_1} + S \cdot \frac{\lambda_{x_1}}{I_{x_1}}; \\ \Omega_{y_1} &= \omega_{y_1} + S \cdot \frac{\lambda_{y_1}}{I_{y_1}}; \\ \Omega_{z_1} &= \omega_{z_1} + S \cdot \frac{\lambda_{z_1}}{I_{z_1}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Omega_{x_1}$ ,  $\Omega_{y_1}$ ,  $\Omega_{z_1}$  – проекции вектора угловой скорости КА на оси связанной системы координат в конце удара;

$\omega_{x_1}$ ,  $\omega_{y_1}$ ,  $\omega_{z_1}$  – проекции вектора угловой скорости КА на оси связанной системы координат в начале удара.

## Проекции

$$\vec{V}_C = \vec{v}_C + \frac{S}{M_{КА}} \cdot \vec{i}_C \quad (11)$$

на оси ССК будут иметь вид:

$$V_{Cx_1} = v_{Cx_1} + \frac{S_{x_1}}{M_{КА}};$$

$$V_{Cy_1} = v_{Cy_1} + \frac{S_{y_1}}{M_{КА}};$$

$$V_{Cz_1} = v_{Cz_1} + \frac{S_{z_1}}{M_{КА}},$$

где  $V_{Cx_1}$ ,  $V_{Cy_1}$ ,  $V_{Cz_1}$  – проекции вектора скорости центра масс КА на оси ССК после столкновения с ЧКМ;

$v_{Cx_1}$ ,  $v_{Cy_1}$ ,  $v_{Cz_1}$  – проекции вектора скорости движения центра масс КА на оси ССК до столкновения с ЧКМ;

$S_{x_1}$ ,  $S_{y_1}$ ,  $S_{z_1}$  – проекции вектора ударного импульса на оси ССК, вычисляемые в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, по формулам:

$$S_{x_1} = S \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta;$$

$$S_{y_1} = S \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta;$$

$$S_{z_1} = S \cdot \sin \delta.$$

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОК**

В общем случае при движении КА перегрузки, действующие на элементы конструкции КА, не равны между собой [8]. Перегрузка, действующая на элемент конструкции КА, определяется суммой всех поверхностных сил, действующих на данный элемент, включая силу, возникающую в результате соударения с частицей.

Для определения проекций перегрузки на оси ССК следует разложить ударную силу на две составляющих, одна из которых ( $\vec{F}_r$ ) направлена по радиусу-вектору  $\vec{r}$  (рис. 2), а другая ( $\vec{F}_p$ ) – лежит в плоскости, перпендикулярной ему. При этом центр масс КА аппарата получит ускорение от составляющей ударной силы  $\vec{F}_r$ , и перегрузка в центре масс КА от ударной силы будет определяться выражением [9]

$$\vec{n}_C = \frac{\vec{F}_r}{M_{КА} \cdot g},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Выражение для определения составляющей ударной силы  $\vec{F}_r$  имеет вид

$$F_r = \frac{F_{cp} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta \cdot x_{1K} + F_{cp} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \cdot y_{1K} + F_{cp} \cdot \sin \delta \cdot z_{1K}}{r},$$

где  $x_{1K}$ ,  $y_{1K}$ ,  $z_{1K}$  – координаты точки соударения в ССК, вычисляемые по формулам:

$$\begin{aligned}x_{1K} &= r \cdot \cos \gamma \cdot \cos \beta; \\y_{1K} &= r \cdot \cos \gamma \cdot \sin \beta; \\z_{1K} &= r \cdot \sin \gamma.\end{aligned}$$

Проекции вектора перегрузки центра масс КА на оси ССК будут составлять:

$$\begin{aligned}n_{C_{x_1}} &= \frac{F_r}{M_{КА} \cdot g} \cdot \frac{x_{1K}}{\sqrt{x_{1K}^2 + y_{1K}^2 + z_{1K}^2}}; \\n_{C_{y_1}} &= \frac{F_r}{M_{КА} \cdot g} \cdot \frac{y_{1K}}{\sqrt{x_{1K}^2 + y_{1K}^2 + z_{1K}^2}}; \\n_{C_{z_1}} &= \frac{F_r}{M_{КА} \cdot g} \cdot \frac{z_{1K}}{\sqrt{x_{1K}^2 + y_{1K}^2 + z_{1K}^2}}.\end{aligned}\tag{12}$$

В точке соударения к ускорению центра масс от ударной силы добавятся ускорения относительного движения от этой же силы. Проекция этого ускорения вычисляются по соотношениям [10]:

$$\begin{aligned}\Delta a_{K_{x_1}} &= \Delta \omega_{x_1} \cdot (\Delta \omega_{x_1} \cdot x_{1K} + \Delta \omega_{y_1} \cdot y_{1K} + \Delta \omega_{z_1} \cdot z_{1K}) - \Delta \omega^2 \cdot x_{1K}; \\ \Delta a_{K_{y_1}} &= \Delta \omega_{y_1} \cdot (\Delta \omega_{x_1} \cdot x_{1K} + \Delta \omega_{y_1} \cdot y_{1K} + \Delta \omega_{z_1} \cdot z_{1K}) - \Delta \omega^2 \cdot y_{1K}; \\ \Delta a_{K_{z_1}} &= \Delta \omega_{z_1} \cdot (\Delta \omega_{x_1} \cdot x_{1K} + \Delta \omega_{y_1} \cdot y_{1K} + \Delta \omega_{z_1} \cdot z_{1K}) - \Delta \omega^2 \cdot z_{1K},\end{aligned}\tag{13}$$

где  $\Delta \omega_{x_1}, \Delta \omega_{y_1}, \Delta \omega_{z_1}$  – изменения угловой скорости относительно осей ССК, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta \omega_{x_1} &= \Omega_{x_1} - \omega_{x_1}; \\ \Delta \omega_{y_1} &= \Omega_{y_1} - \omega_{y_1}; \\ \Delta \omega_{z_1} &= \Omega_{z_1} - \omega_{z_1}.\end{aligned}$$

С учетом соотношений (12) и (13) выражение для вычисления полной перегрузки будет иметь вид

$$n_K = \sqrt{n_{K_{x_1}}^2 + n_{K_{y_1}}^2 + n_{K_{z_1}}^2},$$

где  $n_{K_{x_1}}, n_{K_{y_1}}, n_{K_{z_1}}$  – проекции вектора полной перегрузки на оси ССК, вычисляемые по формулам:

$$\begin{aligned}n_{K_{x_1}} &= n_{C_{x_1}} + \frac{\Delta a_{K_{x_1}}}{g}; \\ n_{K_{y_1}} &= n_{C_{y_1}} + \frac{\Delta a_{K_{y_1}}}{g}; \\ n_{K_{z_1}} &= n_{C_{z_1}} + \frac{\Delta a_{K_{z_1}}}{g}.\end{aligned}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика позволяет определять оценочные значения угловой скорости КА и перегрузки, возникающих в результате столкновения с частицами космического мусора, которые могут быть использованы для идентификации воздействия частиц, с целью свое-

временного выявления повреждений и принятия мер по возможному восстановлению работоспособности КА.

В отдельных случаях полученные данные об угловых возмущениях целесообразно использовать для обоснования потребных запасов компонентов топлива для их парирования, а также дополнительных требований по устойчивости элементов конструкции КА.

### Список используемых источников

1. Космический мусор: Проблема и пути решения: в 3 т. / В.Л. Иванов, В.А. Меньшиков, Л.А. Пчелинцев, В.В. Лебедев. – М.: Патриот, 1996. – Т.1. – 360 с.
2. Методика определения параметров ударного взаимодействия частиц с элементами конструкции космического аппарата / П.С. Гончаров, А.М. Денисов, М.В. Житный, Н.М. Тимофеев // Известия ТулГУ. – 2017. – Вып. 5. – С.214–221.
3. Расчетно-экспериментальная методика определения параметров ударного взаимодействия частиц космического мусора с конструкцией космического аппарата / П.С. Гончаров, А.М. Денисов, М.А. Светлорусов, Н.М. Тимофеев // Современные проблемы механики и ее преподавание в ВУЗе: труды всероссийской научно-методической конференции. Санкт-Петербург, 14-15 октября 2014 г. – СПб., 2015. – Т.2. – С.66–69.
4. Моделирование влияния космического мусора на элементы орбитальных станций и космических аппаратов: науч.-техн. сб. / под ред. С.С. Ветелева. – СПб.: МО РФ, 1997. – 83 с.
5. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1968. – Т. II. – 624 с.
6. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
7. Бутенин Н.В., Луңц Я.Л., Меркин Д.Р. Теоретическая механика. – М.: Наука, 1984. – Т. II. – 464 с.
8. Тарасов Ю.Л. Прочность конструкций самолетов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева, 2012. – Ч.1. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM). – 9,61 Мбайт.
9. Кудрин Г.И., Насонов В.П., Слезкинский С.К. Теория полета ракет-носителей. – МО РФ, 1994. – 736 с.
10. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1968. – Т. I. – 512 с.

Л.К. Горшков,  
*доктор техн. наук, профессор;*  
А.М. Денисов,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
О.Н. Мищерякова;  
В.И. Щербаков,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **ПРЕДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МАНЕВРА ПРИВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ В РЕЖИМ РОТАЦИИ**

Приведена постановка задачи оптимального управления скоростью силовой выборки троса для перевода космической тросовой системы из режима либрационных колебаний в режим ротации. Получены приближенные интегралы общего решения как функции от краевых условий, на основе которых получены оценки параметров процесса.

Ключевые слова: космическая тросовая система (КТС), либрационные колебания, ротация, оптимальное управление, параметры процесса.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Потенциальные варианты практического использования КТС [3] предполагают три устойчивых режима движения КТС: режим гравистабиллизации, режим либрационных колебаний и режим ротации [1]. Перевод КТС из некоторого начального фазового состояния в устойчивый режим движения является сложной математической задачей, имеющей множество решений. Достаточно хорошо изучены схемы и алгоритмы приведения КТС в стационарный режим и режим либрационных колебаний [1–3, 11]. Гораздо меньше публикаций и исследований посвящены процессу приведения КТС в режим ротации. В работах [4, 5] приведено решение этой задачи, в котором управляющие воздействия создаются с помощью реактивных двигателей. Такой подход предполагает наличие технически сложных систем управления процессом перевода КТС в режим ротации.

Существует принципиальная возможность перевода связки двух космических аппаратов в режим ротации без использования реактивной тяги и других внешних сил, которая теоретически обоснована в работе [12], а разработанный на ее основе способ развертывания и закрутки относительно центра масс космической тросовой системы с помощью гравитационных и внутренних сил запатентован [13]. Способ предполагает пассивное развертывание КТС в плоскости исходной орбиты при фиксированной длине троса и перевод системы в режим либрационных колебаний, из которого она переходит в режим ротации путем силовой выборки троса. Главным недостатком способа является большая скорость выборки троса, достигающая нескольких десятков метров в секунду [12].

В настоящей публикации представлены результаты исследования предельных оценок параметров процесса приведения КТС в режим ротации при отсутствии жестких ограничений на время выполнения маневра.

### **СХЕМА ПРОЦЕССА ЗАКРУТКИ**

Рассматривается схема закрутки относительно центра масс связки двух КА. Концевые массы КТС  $m_i$ ,  $i = 1, 2$ , соединены тонким тросом, длина которого может изменяться с помощью устройства подачи-выборки троса. В исходном положении до разделения система со-

вершает монолитное движение по круговой орбите радиуса  $r_c$ . Разделение объектов производится по линии вектора местной круговой скорости механическим толкателем. Потенциальная энергия толкателя обеспечивает стартовый импульс разделения  $\Delta V$ .

Схема процесса закрутки КТС содержит в себе целиком схему процесса запуска КА на другую орбиту из режима попутного колебательного движения [8]. Графически схема процесса закрутки КТС показана на рис.1 в виде годографа векторов перемещения концевых масс. Для равновеликих концевых масс связки их траектории относительного движения практически симметричны относительно центра масс. Технологически процесс закрутки КТС можно разделить на несколько этапов (рис. 1).

0. Импульсное трансверсальное разделение объектов КТС на исходной орбите.
- 0 – 1<sub>2</sub>. Пассивное развертывание КТС при свободной подаче троса.
- 1<sub>2</sub> – 2. Попутное маятниковое движение КТС.
- 2 – 3. Стягивание КТС путем силовой выборки троса.
- 3 – 4. Ротация КТС с заданными параметрами при фиксированной длине троса.

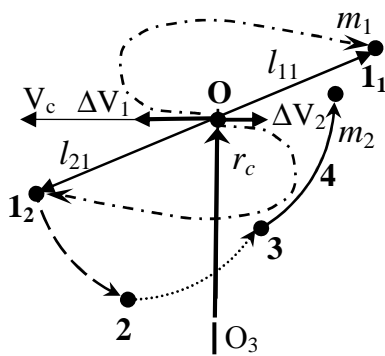


Рис. 1. Схема процесса закрутки

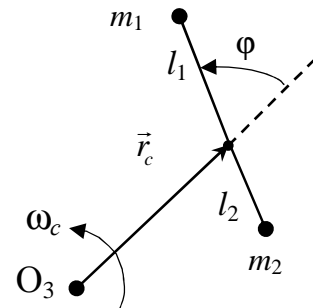


Рис. 2. Параметры положения концевых масс

Движение КТС на участках траектории 1–4 осуществляется на натянутом тросе, при этом текущее положение концевых масс целесообразно определять полярными координатами (рис. 2) в плоскости исходной орбиты.

Таким образом, рассматриваемая схема процесса закрутки КТС предполагает последовательное решение комплекса взаимосвязанных задач.

При исследовании процесса закрутки приняты следующие допущения:

- движение КТС рассматривается в ньютоновском поле притяжения. Орбита центра масс КТС круговая;
- трос – невесомая, гибкая и нерастяжимая нить;
- при пассивном развертывании КТС (участок 0–1) трос подается без сопротивлений;
- стягивание КТС производится с постоянной скоростью выборки троса [5].

## АНАЛИЗ СХЕМЫ ПРОЦЕССА ЗАКРУТКИ

Исходное состояние КТС определяется радиусом круговой стартовой орбиты ( $r_c$ ). Параметрами системы являются соотношение масс концевых элементов ( $\bar{m} = m_2/m_1$ ), величина стартового импульса разделения элементов КТС ( $\Delta V$ ), а также скорость выборки троса  $V_i$  при стягивании КТС на участке 2–3 (см. рис. 1).

Оптимальная по энергетике схема процесса закрутки КТС [12] предусматривает следующую последовательность операций. После импульсного разделения объектов и пассивного

развертывания КТС переводится в режим попутного либрационного движения с начальными условиями:

$$\varphi_1 = -\arccos\sqrt{\Delta\bar{V}}; \quad \bar{\varphi}_1 = \sqrt{2\Delta\bar{V}}; \quad \bar{l}_1 = \bar{l}_{11} + \bar{l}_{21} = 18,4 \cdot \Delta\bar{V}; \quad \bar{V}_{l1} = 0,$$

где  $\bar{\varphi}_1, \bar{l}_1, \bar{V}_{l1}$  – безразмерные параметры относительного движения КТС, нормированные по параметрам абсолютного движения ее центра масс,

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi}{\omega_c}; \quad \bar{l} = \frac{l}{r_c}; \quad \bar{V}_l = \frac{\dot{l}}{V_c};$$

$\Delta\bar{V}$  – безразмерный импульс скорости при расталкивании объектов связки на исходной орбите,  $\Delta\bar{V} = \Delta V/V_c$ .

Уравнения относительного движения КТС, центр масс которой движется по круговой орбите, имеют вид [8]:

$$\frac{\bar{V}_l}{\bar{l}} - (\bar{\varphi} + 1)^2 + 1 - 3\cos^2\varphi + \bar{j} = 0;$$

$$\bar{\varphi} + \frac{2\bar{V}_l}{\bar{l}}(\bar{\varphi} + 1) + 3\sin\varphi\cos\varphi = 0.$$

В первом уравнении  $\bar{j}$  – безразмерное ускорение силы натяжения троса. Если зафиксировать длину троса ( $\bar{V}_l = 0$ ), то уравнение углового движения

$$\bar{\varphi} + 3\sin\varphi\cos\varphi = 0$$

вместе с уравнением реакции троса:

$$F_n = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} l \omega_c^2 \bar{j}, \quad \bar{j} = (\bar{\varphi} + 1)^2 - 1 + 3\cos^2\varphi,$$

является математической моделью маятникового движения. Интеграл энергии при этом имеет близкое к нулевому отрицательное значение [1]:

$$h = \bar{\varphi}^2 - 3\cos^2\varphi = -\Delta\bar{V} \rightarrow 0.$$

Заметим, что для перевода КТС из режима попутного либрационного движения в режим ротации достаточно управляющих воздействий, обеспечивающих положительное значение интеграла энергии. Это может быть достигнуто стягиванием КТС за счет силовой выборки троса [12, 13]. Начало и окончание этого процесса определяются фазовыми углами  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  (см. рис. 1), значение которых требуется определить.

Программа управления процессом стягивания КТС в виде скорости выборки троса  $\bar{u}(t) = -\bar{V}_l(t)$  в угловом секторе  $\varphi_2 < \varphi < \varphi_3$  определяет приращение энергии ротации на величину  $\Delta h$ .

Конечное состояние системы после ее приведения до заданного уровня энергии ротации однозначно определяется фазовым углом  $\varphi_3$ , остаточной длиной троса  $l_3$  и приращением безразмерной энергии вращения  $\Delta h$ . В соответствии с [1] параметры конечного состояния КТС определяются с помощью интеграла энергии:

$$\bar{\varphi}_3^2 - 3\cos^2\varphi_3 = \bar{\varphi}_2^2 - 3\cos^2\varphi_2 + \Delta h,$$

при этом переходная траектория описывается системой уравнений:

$$\bar{\varphi} \frac{d\bar{l}}{d\varphi} = -\bar{u}(t); \quad \bar{\varphi} \frac{d\bar{\varphi}}{d\varphi} = 2\bar{u} \frac{\bar{\varphi} + 1}{\bar{l}} - 3\sin\varphi \cdot \cos\varphi. \quad (1)$$

Поиск оптимального управления процессом стягивания КТС и перевода ее в режим ротации определяется из условия минимизации времени стягивания при постоянной скорости выборки троса, что соответствует максимизации кинетического момента вращения КТС относительно ее центра масс.



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача оптимизации программы выборки троса при переводе системы из начального состояния в конечное имеет целью определение оптимальной программы стягивания КТС:

$$\bar{u}(t) \leq \bar{a} \quad \text{или} \quad \bar{u}(\varphi) \leq \frac{\bar{a}}{\bar{\varphi}} \quad \text{для} \quad \varphi_2 < \varphi < \varphi_3,$$

( $\bar{a}$  – максимально допустимое значение безразмерной скорости выборки троса) и соответствующей переходной траектории (1), которая переводит систему из начального положения:

$$\bar{\varphi}^2(\varphi_2) - 3\cos^2\varphi_2 = 0, \quad \bar{l}(\varphi_2) = \bar{l}_1$$

в конечное:

$$\bar{\varphi}^2(\varphi_3) - 3\cos^2\varphi_3 - \Delta h = 0$$

при минимальной длине выбранного троса, которая определяется выражением

$$\Delta \bar{l} = \bar{l}(\varphi_2) - \bar{l}(\varphi_3) = \int_{\varphi_2}^{\varphi_3} \frac{\bar{u}}{\bar{\varphi}} d\varphi.$$

В терминах теории оптимального управления перед нами задача Майера с двумя подвижными концами [10].

## АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Приближенное аналитическое решение поставленной задачи с использованием принципа максимума Понтрягина с оценкой точности решения приведено в работе [12]. В основе исследований лежит метод решения, который может быть представлен в виде следующего алгоритма.

**Шаг 1.** Задают исходные данные:  $r_c$  – радиус исходной круговой орбиты;  $\Delta V$  – импульс скорости расталкивания;  $\Delta h$  – изменение значения интеграла энергии;  $\Delta\varphi$  – размер сектора стягивания КТС.

**Шаг 2.** Вычисляют вспомогательные параметры:

$$\Delta \bar{V} = \Delta V / V_c; \quad V_c = \sqrt{\mu / r_c}; \quad \omega_c = \sqrt{\mu / r_c^3}; \quad T_c = 2\pi / \omega_c.$$

**Шаг 3.** Определяют параметры движения КТС в конце участка разворачивания:

$$\varphi_1 = -\arccos\sqrt{\Delta \bar{V}}; \quad \bar{\varphi}_1 = \sqrt{2\Delta \bar{V}}; \quad \bar{l}_1 = 18,4 \cdot \Delta \bar{V}.$$

**Шаг 4.** Определяют границы области стягивания КТС  $\varphi \in (\varphi_2, \varphi_2 + \Delta\varphi)$ :

$$\varphi_2 = \pi - \frac{1}{2} \arctan \frac{\sin 2\Delta\varphi}{B(\Delta\varphi) + \cos 2\Delta\varphi}; \quad B(\Delta\varphi) = \sqrt{1 + \frac{\Delta h}{3 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}}.$$

**Шаг 5.** Вычисляют средние значения параметров  $\bar{\varphi}_{\text{ср}}$  и  $A$ :

$$A = 4\bar{\varphi}_{\text{ср}}(\bar{\varphi}_{\text{ср}} + 1); \quad \bar{\varphi}_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(\bar{\varphi}_2 + \bar{\varphi}_3); \quad \bar{\varphi}_2 = \sqrt{3 \cos^2 \varphi_2}; \\ \bar{\varphi}_3 = \sqrt{3 \cos^2(\varphi_2 + \Delta\varphi) + \Delta h}.$$

**Шаг 6.** Вычисляют параметры, характеризующие процесс закрутки КТС:

- относительную длину выбранного троса:  $\Delta \bar{l} = \bar{l}_1(1 - \exp(-\Delta h/A))$ ;
- долю выбранного троса после стягивания КТС:  $J = \Delta \bar{l} / \bar{l}_1 = 1 - \exp(-\Delta h/A)$ ;
- удельную долю выбранного троса:  $J_h = J/\Delta h$ ;
- время выборки троса:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta \varphi}{2\pi \cdot \bar{\varphi}_{\text{ср}}};$$

- безразмерную скорость выборки троса

$$\bar{a} = \frac{\Delta \bar{t}}{\Delta \varphi} \bar{\varphi}_{\text{ср}};$$

- время окончания процесса закрутки КТС:

$$\bar{t}_3 = 1,114 + \frac{1}{2\pi\sqrt{3}} \ln \left( -\frac{1 + \sin \varphi_1}{1 + \sin \Delta\varphi/2} \cdot \frac{\cos \Delta\varphi/2}{\cos \varphi_1} \right) + \frac{\Delta\varphi}{2\pi\bar{\varphi}_{\text{ср}}}.$$

Исследованная схема процесса приведения КТС в режим ротации достаточно технологична и позволяет реализовать перевод КТС в режим ротации с малым значением интеграла энергии. Но в области значений интеграла энергии  $h > 1$  скорость выборки троса возрастает и достигает значений десятков метров в секунду. Очевидно, что снижение скорости выборки троса возможно в дискретном режиме стягивания КТС на нескольких периодах ротации.

### ПРЕДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗАКРУТКИ КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Если не наложено ограничений на длительность процесса закрутки КТС или время выборки троса превышает время полного оборота КТС вокруг центра масс, то закрутка КТС до заданной величины интеграла энергии  $\Delta h$  ротационного движения выполняется на нескольких периодах ротации. При этом энергия ротационного движения изменяется дискретно:

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n, \quad (2)$$

где  $\Delta h_i$  – приращение интеграла энергии ротационного движения после  $i$ -го участка стягивания КТС,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Четные индексы соответствуют участкам стягивания в зенитной области, нечетные – в области надира. Размеры секторов стягивания  $\Delta\varphi_i$  при такой стратегии будут малы, а среднее значение относительной угловой скорости ротации КТС на  $i$ -ом участке за время ее свертывания оценивается выражением

$$\bar{\varphi}_{\text{ср}i} = \bar{\varphi}_{2i} \left( 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta h_i}{\bar{\varphi}_{2i}^2} \right), \quad (3)$$

где  $\bar{\varphi}_{2i}^2 = 3 \cos^2 \frac{\Delta\varphi_i}{2} + \sum_{k=0}^{i-1} \Delta h_k$ ;

$$\Delta h_0 = 0.$$

Выражение (3) справедливо для значений  $\Delta h_i \leq 3$ . При этом погрешность оценки параметра  $\bar{\varphi}_{\text{ср}i}$  не превышает 4%. При  $\Delta h_i \leq 1,5$  погрешность оценки не превышает 1%.

В области значений  $\Delta\varphi_i < 25^\circ$  можно применить расчетную формулу, которая не учитывает угловой размер области выборки троса:

$$\bar{\varphi}_{2i}^2 \approx 3 + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta h_k, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Точность такой оценки не превышает 4%. Применение этой формулы в выражениях для вычисления доли выбранного троса на  $i$ -ом участке стягивания КТС ( $J_i = \Delta \bar{t}_i / \bar{t}_{1i}$ ) и удельной доли выбранного троса ( $J_{hi} = J_i / \Delta h_i$ ) позволяет функционально выразить эти показатели только от одного аргумента – от величины приращения интеграла энергии  $\Delta h_i$ :

$$J_i = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta h_i}{A_i}\right) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(-\frac{\Delta h_i}{A_i}\right)^m = - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(-\frac{\Delta h_i}{A_i}\right)^m ; \quad (4)$$

$$\bar{\Phi}_{cpi} = \sqrt{3 + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta h_k} \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta h_i}{4} \left( 3 + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta h_k \right)^{-1} \right]; \quad A_i = 4\bar{\Phi}_{cpi} (\bar{\Phi}_{cpi} + 1). \quad (5)$$

Из (4) видно, что показатель качества процесса закрутки КТС функционально зависит от параметра ряда  $\Delta h/A$ . Графическая зависимость этого параметра от приращения величины интеграла энергии  $\Delta h$  показана на рис. 3. Максимальное значение параметра не превосходит значение  $\Delta h/A < 0,2$  при  $\Delta h < 10$ .

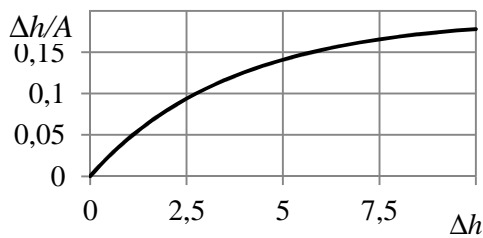


Рис. 3. Область допустимых значений параметра ряда (4)

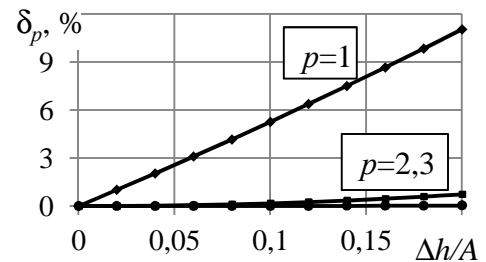


Рис. 4. График относительной погрешности приближения

В преобразованиях выражения (4) использовано представление экспоненциальной функции в виде ряда. Его можно упростить, если ограничиться конечным числом  $p < \infty$  ряда разложения:

$$J_i \approx - \sum_{m=1}^p \frac{1}{m!} \left(-\frac{\Delta h_i}{A_i}\right)^m . \quad (6)$$

По признаку Лейбница для знакопеременного ряда его остаток имеет тот же знак, что и первый отбрасываемый член, и меньше его по абсолютной величине. Следовательно, член ряда с номером  $p + 1$  является оценкой абсолютной погрешности приближения:

$$\Delta_p = |J_{\infty} - J_p| < \frac{1}{(p + 1)!} \left(\frac{\Delta h}{A}\right)^{p+1} .$$

Относительная погрешность такого приближения определяется выражением

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{J_{\infty}} = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta h}{A}\right) \right]^{-1} \cdot \frac{1}{(p + 1)!} \left(\frac{\Delta h}{A}\right)^{p+1} .$$

График такой погрешности для значений  $p = 1, 2, 3$  изображен на рис. 4. Максимальное значение аргумента  $\Delta h_i/A_i < 0,12$  при  $\Delta h_i \leq 3$ . Поэтому с погрешностью менее 6 % можно использовать приближение для вычисления доли длины выбранного троса на  $i$ -м участке стягивания КТС в виде ( $p = 1$ ):

$$J_i = \frac{\Delta \bar{l}_i}{\bar{l}_{1i}} = \frac{\Delta h_i}{A_i} .$$

При этом доля длины выбранного троса, отнесенная к приращению интеграла энергии, определится выражением

$$J_{hi} = \frac{J_i}{\Delta h_i} = A_i^{-1} .$$

Погрешность приближения (6) с двумя слагаемыми ( $p = 2$ ) в рассматриваемой области значений  $\Delta h_i/A_i < 0,12$  не превышает 1 %.

Безразмерную длину выбранного троса на  $i$ -м участке стягивания получим из выражения

$$\Delta \bar{l}_i = J_i \cdot \bar{l}_{1i}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $\bar{l}_{1i}$  – длина троса КТС в начале  $i$ -го участка стягивания:

$$\bar{l}_{1i} = \bar{l}_1 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta \bar{l}_k, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Выражение для определения суммарной длины выбранного троса после  $n$ -кратного стягивания КТС до заданного значения интеграла энергии ротационного движения  $h_1 + \Delta h = h_1 + \Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n$  примет вид

$$\Delta \bar{l}_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta \bar{l}_i. \quad (7)$$

Сравним длину выбранного троса в дискретной стратегии коротких участков стягивания  $\Delta \bar{l}_\Sigma$  с длиной троса, выбранной за один продолжительный интервал стягивания:

$$\Delta \bar{l} = \bar{l}_1 \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta h}{A}\right) \right) = \bar{l}_1 \left( - \sum_{m=1}^p \frac{1}{m!} \left(-\frac{\Delta h}{A}\right)^m \right). \quad (8)$$

С этой целью преобразуем выражение (7) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{l}_1 &= \bar{l}_1 \cdot J_1; \\ \Delta \bar{l}_2 &= \bar{l}_{12} \cdot J_2 = (\bar{l}_1 - \Delta \bar{l}_1) J_2 = (\bar{l}_1 - \bar{l}_1 \cdot J_1) J_2 = \bar{l}_1 (1 - J_1) J_2; \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta \bar{l}_i &= \bar{l}_1 \cdot J_i \cdot \prod_{k=1}^{i-1} (1 - J_k). \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), получим:

$$\Delta \bar{l}_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta \bar{l}_i = \bar{l}_1 \sum_{i=1}^n J_i \cdot \prod_{k=1}^{i-1} (1 - J_k) = \bar{l}_1 \sum_{i=1}^n J_i \cdot \prod_{k=1}^{i-1} \exp\left\{-\frac{\Delta h_k}{A_k}\right\} = \bar{l}_1 \sum_{i=1}^n J_i \cdot \exp\left\{-\sum_{k=1}^{i-1} \frac{\Delta h_k}{A_k}\right\},$$

или

$$\Delta \bar{l}_\Sigma = \bar{l}_1 \left[ 1 - \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{A_i}\right\} \right] = \bar{l}_1 \left[ - \sum_{m=1}^p \frac{1}{m!} \left(-\sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{A_i}\right)^m \right]. \quad (10)$$

Сравним длины выбранного троса в разных стратегиях закрутки КТС через соотношение их величин, которые определяются выражениями (8) и (10):

$$\Phi = \frac{\Delta \bar{l}_\Sigma}{\Delta \bar{l}} = \sum_{m=1}^p \frac{1}{m!} \left(-\sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{A_i}\right)^m \cdot \left(\sum_{m=1}^p \frac{1}{m!} \left(-\frac{\Delta h}{A}\right)^m\right)^{-1}, \quad (11)$$

или, полагая  $p = 2$ , получим:

$$\Phi = \frac{\Delta \bar{l}_\Sigma}{\Delta \bar{l}} = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{A_i} - \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{A_i}\right)^2 \right] \cdot \left[ \frac{\Delta h}{A} - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{A}\right)^2 \right]^{-1}; \quad (12)$$

то же при  $p = 1$  и  $\Delta h \leq 3$ :

$$\Phi = \frac{\Delta \bar{l}_\Sigma}{\Delta \bar{l}} = \frac{A}{\Delta h} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{A_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{\Delta h} \cdot \frac{A}{A_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \bar{h}_i}{\bar{A}_i}. \quad (13)$$

Выражение (11) представляет собой отношение степенных знакопеременных рядов с одинаковыми коэффициентами, но различными основаниями, которые по абсолютной величине меньше единицы. Величина  $\Phi \geq 1$ , так как

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{A_i} \geq \frac{\Delta h}{A}, \quad \text{где } \Delta h = \sum_{i=1}^n \Delta h_i. \quad (14)$$

Из соотношений (11) и (14) следует, что квантовая стратегия стягивания КТС уступает маневру однократного стягивания по показателю выбранной длины троса. Таким образом, для дискретной стратегии актуальна постановка задачи оптимального разбиения заданной величины приращения энергии  $\Delta h$  на  $n$  частей: для заданных значений  $\Delta h$  и  $n$  нужно определить оптимальную последовательность  $\Delta h_i, i = 1, 2, \dots, n$ , доставляющую минимум (или точную нижнюю грань) (11) при условии (2), (5) и

$$\bar{\phi}_{\text{ср}} = \sqrt{3} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta h}{12} \right), \quad A = 4\bar{\phi}_{\text{ср}}(\bar{\phi}_{\text{ср}} + 1) = 18,9 + 2,6\Delta h + 0,083\Delta h^2. \quad (15)$$

Такая задача является задачей нелинейного программирования. Она не имеет аналитического решения даже для простейших условий: при  $p = 1$  и  $n = 2$ . По этой причине на рис. 5–7 представлены результаты численного решения задачи закрутки КТС на заданную величину интеграла энергии  $\Delta h$  в двух секторах стягивания.

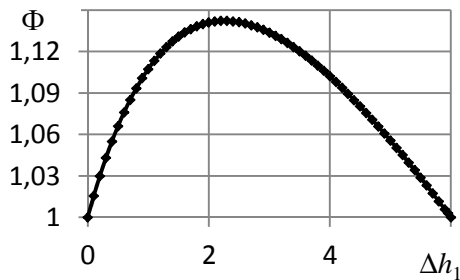


Рис. 5. График функции показателя качества,  $\Delta h = 6$

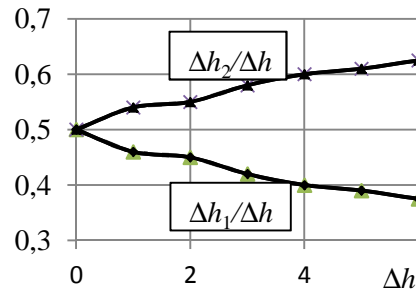


Рис. 6. Координаты экстремума показателя качества

На рис. 5 изображен график зависимости функции показателя качества (13)  $\Phi(\Delta h_1)$  для различных последовательностей  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2 = \Delta h - \Delta h_1, \Delta h = 6$ . Функция унимодальна, имеет выраженный экстремум, который с увеличением  $\Delta h$  смещается к линии ординат. О наличии дрейфа свидетельствуют координаты экстремума показателя качества на рис. 6. Координаты экстремума определяют последовательность  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$ , для которых реализуется наилучший по показателю длины выбранного троса двухшаговый процесс закрутки КТС.

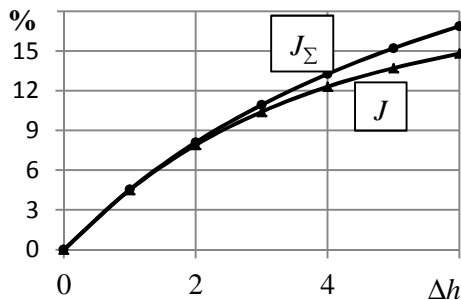


Рис. 7. Доля выбранного троса при стягивании КТС

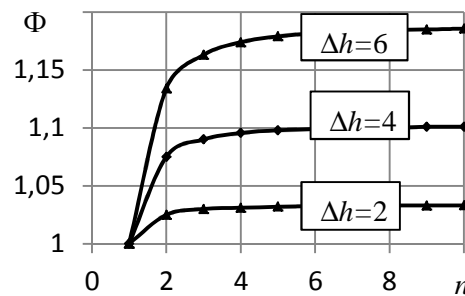


Рис. 8. Эффект «насыщения» показателя качества

Наилучший вариант процесса стягивания характеризуется минимумом показателя качества, который равен единице и достигается в предельных случаях, когда отношение членов последовательности стремится либо к нулю, либо к бесконечности. Реализация этих двух предельных вариантов стягивания наглядно характеризуется долей выбранного троса (рис. 7).

Следует отметить, что даже наихудший из рассмотренных вариантов стягивания КТС (кривая  $J_{\Sigma}$ ) имеет приемлемые абсолютные показатели. Это позволяет расширить постановку задачи и перейти к векторной оптимизации. Например, обеспечение одинаковых (или однородных) условий закрутки КТС на каждом шаге позволит упростить механизм и систему управления стягиванием. Численное исследование показателя (11) для однородных условий  $\Delta h_i = \delta = \Delta h/n$  выявило эффект «насыщения» показателя качества по количеству секторов стягивания (рис. 8), то есть «плохие» свойства многошаговой стратегии стягивания КТС исчерпывающе проявляются только на первых 3-4 шагах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована схема процесса приведения КТС в режим ротации из режима либрационных колебаний. Сформулирована и решена задача оптимального управления процессом выборки троса. При постоянной величине скорости выборки троса функция оптимального управления имеет ступенчатый вид. С использованием теории приближения получены аналитические интегралы решения, приведены оценки точности этих решений. Разработан алгоритм вычисления параметров процесса закрутки КТС.

Численными исследованиями алгоритма установлено, что приведение КТС в режим ротации с интегралом энергии  $h > 1$  на малых интервалах времени, сопоставимых с периодом ротации, достижимо только при больших скоростях выборки троса (несколько десятков метров в секунду). Для снижения этого значения исследована дискретная стратегия закрутки КТС на нескольких периодах ротации. Получены аналитические зависимости для оценки параметров процесса дискретного перевода КТС в режим ротации от исходных данных. Приведена сравнительная характеристика процессов непрерывного и дискретного перевода в режим ротации. Установлено, что по показателю качества эти процессы сопоставимы. При этом реализация дискретной стратегии стягивания КТС позволяет существенно снижать скорость выборки троса на интервале нескольких периодов ротации и переводить КТС в режим ротации с большим значением показателя интеграла энергии.

## Список используемых источников

1. *Белецкий В.В., Левин Е.М.* Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука, 1990. – 336 с.
2. Динамика космических систем с тросовыми и шарнирными соединениями/ А.П. Алпатов, В.В. Белецкий, В.И. Драновский и др. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2007. – 560 с.
3. *Иванов В.А., Купреев С.А., Либерзон М.Р.* Сближение в космосе с использованием тросовых систем.– М.: изд-во «Хоружевский», 2010.– 360 с.
4. *Комаров В.И.* Исследование динамики одной схемы закрутки двухсекционного космического аппарата // Космические исследования. – 1973. – Т. XI, вып. 1. – С. 14–20.
5. *Комаров В.И.* О гравитационной закрутке двухсекционного ИСЗ // Космические исследования. – 1974. – Т. XII, вып. 6. – С. 856–862.
6. *Сидоров И.М.* Об использовании тросовых систем для создания постоянно действующего транспортного канала в космическом пространстве // Полет. – 2000. – №8. – С. 36–39.

7. *Щербаков В.И.* Механика стационарных движений гибко связанных КА. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2007. – 108 с.
8. *Щербаков В.И.* Орбитальные маневры космической тросовой системы. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 185 с.
9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Механика. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
10. *Атанс М., Фалб П.Л.* Оптимальное управление: пер. с англ / под ред. проф. Ю.И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.
11. *Cosmo M.L., Lorenzini E.C.* Tethers in Space Handbook. – Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997.
12. *Щербаков В.И.* Закрутка космической тросовой системы с помощью гравитационных и внутренних сил // Полет. – 2012. – № 5 – С. 52–59.
13. Пат. 2536611 Рос. Федерация. Способ развертывания и закрутки относительно центра масс космической тросовой системы с помощью гравитационных и внутренних сил / Горелов С.К., Софьин А.П., Щербаков В.И. – Заявл. 27.07.12, опубли. 27.12.2014. Бюл. № 36. – 12 с.

И.Г. Грачёв,  
*кандидат техн. наук, доцент;*  
И.А. Дёма;  
В.М. Низовцев,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБТЕКАНИЯ ПОТОКОМ РАЗОГРЕТОГО ГАЗА ОХЛАЖДАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

В публикации рассматриваются процессы обтекания поверхности лопатки турбины реактивных двигателей (РД) летательных аппаратов (ЛА), имеющей малую кривизну, высокотемпературным, высокоскоростным дозвуковым потоком вязкого, теплопроводного газа в условиях локального выдува охлаждающего газа из полости рабочей лопатки в поток межлопаточного пространства турбины. Для интегрирования уравнений Навье – Стокса, описывающих течение вязкого газа, используется конечноразностный метод дробных шагов. Анализируются результаты численного исследования влияния параметров выдуваемого газа и числа Маха  $M_\infty$  основного потока разогретого газа на распределение скорости в потоке, изменение давления и напряжения трения вдоль поверхности. Показано, что при определенных значениях параметров потока и выдуваемого газа на поверхности лопатки возникает дополнительная область повышенного давления. В результате в 1,5–2,5 раза увеличивается поперечная сила, приложенная к лопатке, и вращающий момент на валу турбины. Это позволяет увеличить мощность турбины или снизить расход газа (топлива).

Ключевые слова: реактивный двигатель, турбина, летательный аппарат, поток газа, численное моделирование.

Одним из основных факторов, определяющих возможность функционирования РД, является стабильность его теплового режима. Элементы конструкции двигательной установки, например турбины, сопла, выходные устройства, работают в жестких температурных условиях. Отклонение температуры от допустимых пределов может привести к ухудшению характеристик двигателя, поэтому требуется применение систем охлаждения [1, 2, 3, 4, 5].

Реактивные двигатели ЛА содержат компрессор, камеру сгорания – источник высокотемпературного газа и турбину с сопловыми и рабочими лопатками. Реактивный двигатель, как правило, включает также систему отбора и подачи охлаждающего газа. Газ для охлаждения лопаток турбины отбирается от газогенератора или компрессора [1, 2]. Сопловые и рабочие лопатки снабжены каналами охлаждения и отверстиями для выпуска газа в межлопаточное пространство турбины [4, 5]. Причем часть отверстий для выпуска охлаждающего газа, расположенных на нижней поверхности лопатки, могут быть выполнены в виде проницаемых участков с совокупностью отверстий малого диаметра (рис. 1), создающих плоскую струю, расход газа в которой не превышает 0,7 % от расхода основного потока.

Таким образом, в РД одновременно имеет место сочетание высокотемпературного, высокоскоростного потока газа и движущегося с малой скоростью через поверхность лопатки турбины холодного газа, что может быть использовано для улучшения выходных параметров РД: увеличения мощности турбины или снижения расхода газа через турбину. Поэтому в последнее время актуальным является рассмотрение условий формирования дополнительных областей повышенного давления на поверхностях рабочих лопаток турбины, находящихся в высокоскоростном потоке разогретого вязкого газа при локальном выдуве из внутренней полости лопатки охлаждающего газа в межлопаточное пространство турбины. Формирование таких областей целесообразно для увеличения поперечной силы, действующей на лопатку, и соответствующего крутящего момента на валу турбины. Этим определяется также и новизна



выполненного исследования. Физическая картина протекающих в этих условиях процессов, связанных с образованием неадиабатической зоны, и параметры возмущенного течения в значительной степени зависят от теплофизических свойств, скорости и температуры выдуваемого газа, числа  $M_\infty$  основного потока, а также от расположения на поверхности лопатки участка локального выдува [2, 4].

Подобные исследования представляют интерес, так как их результаты показывают, что силы, создаваемые при выдуве струи холодного газа в высокотемпературный, высокоскоростной дозвуковой поток, за счет сложного их взаимодействия могут значительно превышать реактивную силу инжестируемого газа [6, 7, 8, 9].

Рассмотрим двухмерное высокоскоростное дозвуковое ламинарное течение вязкого, сжимаемого, теплопроводного газа вблизи нижней плоской поверхности (поверхности малой кривизны) рабочей лопатки турбины в условиях локального поперечного выдува холодного газа через участок этой поверхности в высокотемпературный основной поток межлопаточного пространства.

Расчетная схема процесса обтекания показана на рис. 1. Температура участка подвода холодного газа и скорость выдува задавались постоянными или изменялись по определенному закону. Были приняты также следующие допущения. Температура стенки лопатки в общем случае отличается от температуры потока разогретого газа и от температуры охлаждающего газа в полости лопатки. Выдуваемый газ не вступает в химические реакции с газом основного потока в межлопаточных промежутках, а теплофизические свойства газов отличаются незначительно. Нижняя и торцевые поверхности стенки теплоизолированы.

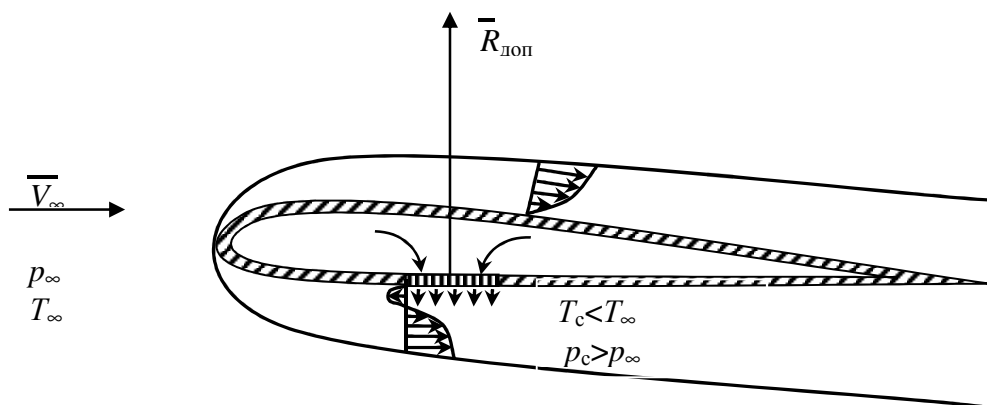


Рис. 1. Схема охлаждаемой лопатки с выдувом газа

Выбранной физической модели процесса обтекания поверхности рабочей лопатки турбины потоком разогретого газа с учетом сформулированных допущений соответствует следующая система дифференциальных уравнений [10]:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \bar{V} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \bar{V} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \Phi; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{V}) = 0; \quad (4)$$

$$p = \rho RT; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = a_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{q_c}{\rho_c c_c}; \quad (6)$$

$$\mu = \mu(T); \quad \lambda = \lambda(T). \quad (7)$$

Начальные условия соответствуют течению газа в пограничном слое на неизотермической поверхности при  $t = 0$ :

$$T(x, y, t) = T(x, y); \quad T_c(x, t) = T_{co}; \quad u(x, y, t) = u(x, y); \quad v(x, y, t) = v(x, y); \quad p(x, y, t) = p_o. \quad (8)$$

Граничные условия:

– при  $x=0$

$$T(x, y, t) = f_1(y); \quad u(x, y, t) = f_2(y); \quad v(x, y, t) = f_3(y); \quad p = p_\infty; \quad \frac{\partial T_c}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

– при  $x=l_n$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0; \quad (10)$$

– при  $y=0$

$$u(x, y, t) = 0; \quad v(x, y, t) = 0; \quad T(x, y, t) = T_c(x, t); \quad 0 \leq x < l_n \text{ и } (l_n + l_x) < x \leq l_n; \quad (11)$$

$$u(x, y, t) = 0; \quad v(x, y, t) = f_1(x); \quad T(x, y, t) = T_c(x, t) = f_2(x); \quad l_n \leq x \leq (l_n + l_x);$$

– при  $y=h$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (12)$$

Система уравнений (1) – (7) включает: уравнения движения в проекции на оси  $x$  и  $y$  (1), (2); уравнение энергии для потока газа (3); уравнение неразрывности (4); уравнение газового состояния (5); уравнение теплопроводности для материала стенки лопатки (6); соотношения, учитывающие зависимости динамического коэффициента вязкости  $\mu$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda$  газа от температуры (7).

Приняты следующие обозначения:  $u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  – поля продольной и поперечной составляющих вектора скорости;  $T(x, y, t)$  – поле температуры газа;  $\rho(x, y, t)$  – поле плотности газа;  $p(x, y, t)$  – поле давления газа;  $T_c(x, t)$  – поле температуры стенки;  $\Phi$  – диссипативная функция;  $R$  – газовая постоянная;  $q_c$  – объемная плотность внутренних источников тепла в материале стенки;  $c_p$  – теплоемкость газа;  $c_c$ ,  $\rho_c$  – удельная теплоемкость и плотность материала стенки;  $a_c$  – коэффициент температуропроводности материала стенки;  $h$  – поперечный размер расчетной области;  $l_n$  – продольный размер расчетной области;  $t$  – время.

Геометрические параметры стенки связаны соотношением  $l_n = l_n + l_x + l_o$  (рис. 2). На рис. 2  $l_p$  – расстояние от передней кромки лопатки до расчетной области.

Уравнения (1) – (3) содержат производные по времени и могут быть решены для переменных величин  $u$ ,  $v$ ,  $T$  при помощи конечноразностного метода дробных шагов [11, 12, 13]. Давление  $p$  оказывается неявным. Если рассматривать установившееся течение газа, то точ-

ный вид процесса установления не имеет большого значения. Поэтому для определения давления применено комбинированное уравнение. Преобразованная таким образом система уравнений (1) – (7) интегрировалась численно методом дробных шагов с использованием неявной разностной схемы переменных направлений [11, 14].

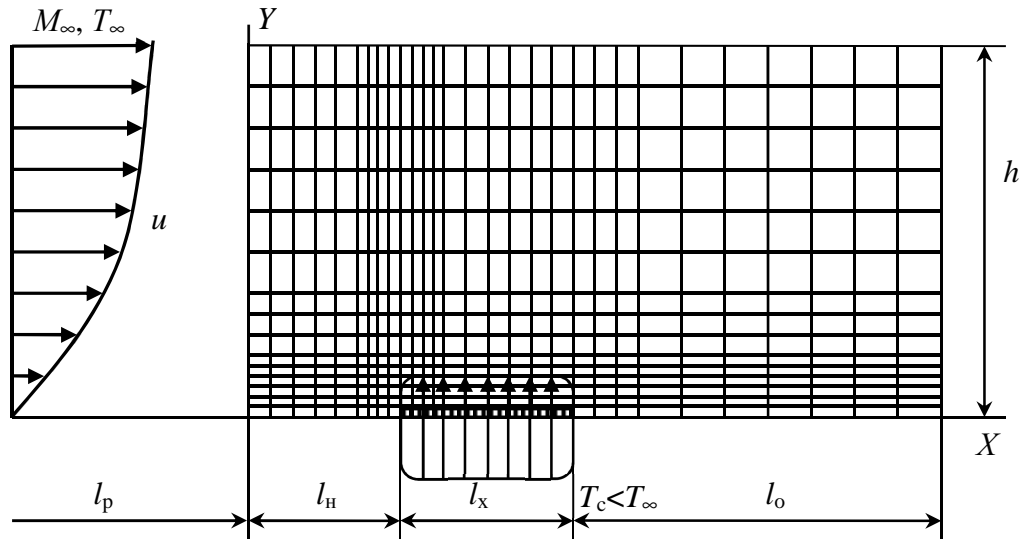


Рис. 2. Расчетная схема и разностная сетка

Определение неизвестных параметров на границах области осуществлялось с помощью формул приближенного дифференцирования, аппроксимирующих граничные условия, а на верхней границе (при  $y=h$ ) – по их значениям во внутренних узлах разностной сетки [12].

Использовалась разностная сетка с переменными шагами по обеим координатным осям. Причем сгущение сетки осуществлялось в направлении к участку локального выдува холодного газа (рис. 2). Шаг по времени определялся с использованием критерия устойчивости Куранта  $\Delta t < \min(\Delta x/u_{\max}, \Delta y/v_{\max})$  и критерия для явной разностной схемы [11, 12]. Для повышения устойчивости разностной схемы локально применялась нелинейная форма искусственной вязкости [7, 13]. Контроль точности численного решения выполнялся путем сравнения с имеющимися аналитическими решениями модельных задач и на основе оценок выполнения законов сохранения в интегральной форме [10, 14].

Расчеты проводились на ПЭВМ при числах Рейнольдса  $Re \leq 10^6$ . Длины участка локального выдува газа и обтекаемой поверхности лопатки относились как 1:6. Минимальная температура участка выдува газа составляла 300–400 К. Массовый расход выдуваемого газа не превышал 0,8% от расхода газа основного потока. Расстояние  $l_p$  составляло несколько сантиметров. Поперечный размер расчетной области  $h$  в 5–10 раз превышал максимальную толщину пограничного слоя. Были приняты следующие средние значения параметров основного потока: скорость  $u_\infty=400\text{--}500$  м/с ( $M_\infty = 0,65\text{--}0,75$ );  $p_\infty = (5\text{--}7)\cdot 10^5$  Па;  $T_\infty = 900\text{--}1200$  К. Теплофизические свойства газа аналогичны свойствам продуктов сгорания РД или воздуха [1, 2]. Решалась задача на установление.

Полученные результаты, показанные на рис. 3–6, и их анализ позволяют сформулировать следующие выводы.

1. На некотором расстоянии от участка локального выдува газа вверх и вниз по течению рассчитанные профили скоростей  $u$ ,  $v$  и распределение напряжения трения  $\tau$  вдоль поверхности хорошо согласуются с решением Блазиуса [10].

2. Вследствие торможения основного высокотемпературного дозвукового потока газа (в соответствии с законом обращения воздействия Л.А. Вулиса [6]) и повышения давления

вблизи участка выдува холодного газа может образовываться область возвратного течения (рис. 3), обусловленная положительным градиентом давления (рис. 4); максимальные скорости возвратного течения могут достигать 100–120 м/с; максимальный поперечный размер области возвратного течения составляет 10–20% от толщины приповерхностного слоя.

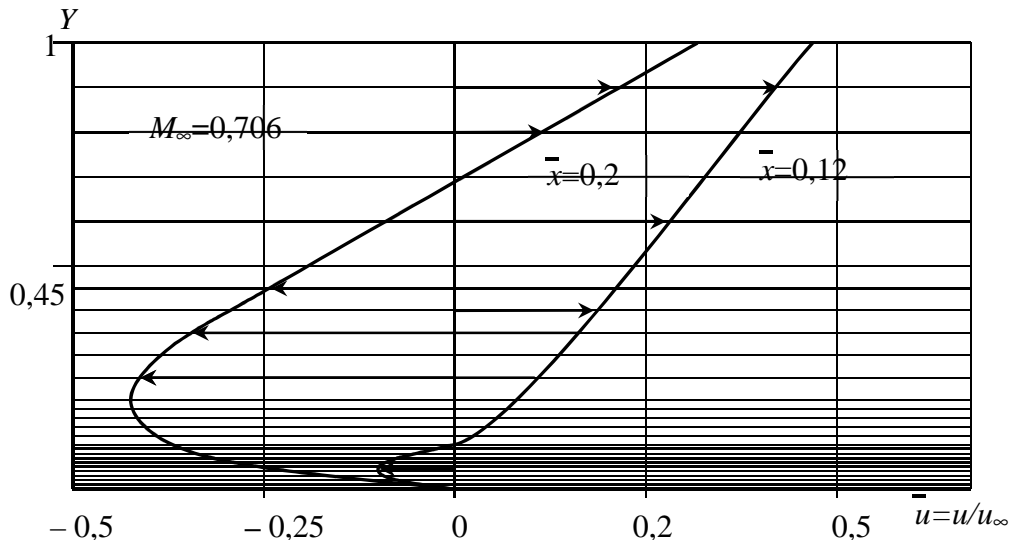


Рис. 3. Профили относительной скорости

3. Напряжения трения (отрицательные) в возвратном течении по абсолютной величине могут превышать их значения на большей части поверхности (рис. 5); в области отрицательных градиентов давления за участком выдува газа напряжения трения оказываются меньшими по сравнению с их значениями в случае отсутствия выдува.

4. При локальном выдуве холодного газа с малой скоростью на обтекаемой нижней поверхности лопатки возникает область повышенного давления (рис. 4), причем максимальная величина относительного избыточного давления (отнесенного к давлению основного потока  $p_\infty$ ) превышает значение 1,3; возникновение этой области в значительной мере связано с образованием зоны возвратного течения и местной сверхзвуковой зоны; область повышенного давления распространяется по пограничному слою в направлении задней и передней кромок лопатки; в области локального выдува газа в основной поток имеют место поперечные градиенты давления, характер изменения давления вдоль нормали к поверхности практически линейный (рис. 6).

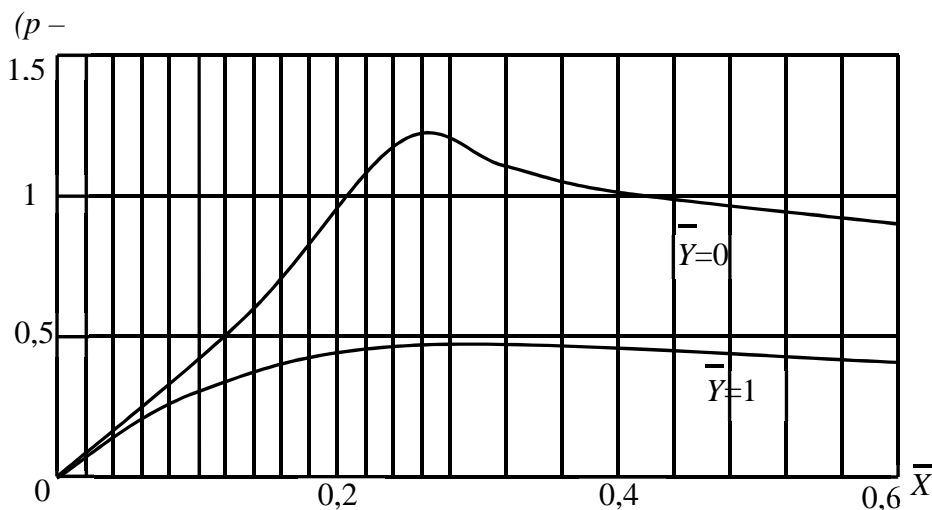


Рис. 4. Изменение относительного избыточного давления вдоль поверхности

5. Увеличение давления на нижних поверхностях лопаток приводит к увеличению перепада давлений на входе в турбину и на выходе из нее, что способствует увеличению положительной работы на ее лопатках.

6. С увеличением числа Маха основного потока  $M_\infty$  при неизменных скорости  $v_c$  и температуре  $T_c$  выдуваемого газа максимальное давление в области выдува газа возрастает, однако темп его роста замедляется, что связано с уменьшением размеров области возвратного течения.

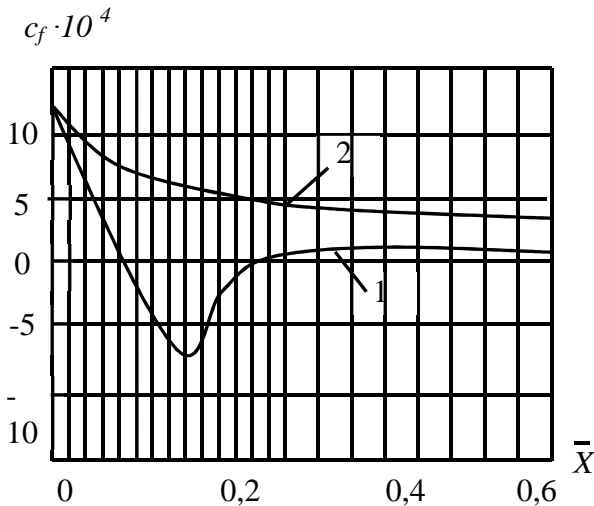


Рис. 5. Изменение коэффициента трения вдоль поверхности: 1 – с выдувом газа; 2 – без выдува газа

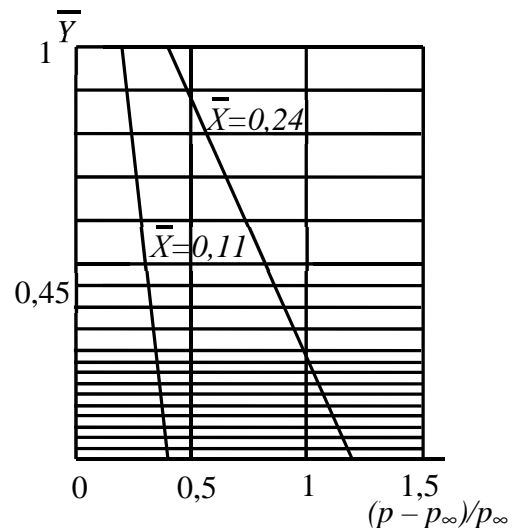


Рис. 6. Изменение относительного избыточного давления по нормали к поверхности стенки

Таким образом, локальный дозвуковой выдув через участок поверхности лопатки низкотемпературной плоской струи газа в набегающий основной дозвуковой высокотемпературный, высокоскоростной поток газа в соответствии с уравнением обращения воздействия [6] приводит к интенсивному торможению основного газового потока, сопровождающемуся повышением давления. В результате этого воздействия на поток возникает дополнительный импульс силы давления, который передается на поверхность рабочей лопатки, и образуется локальная область возвратного течения. Образование этой области приводит к усилению геометрического воздействия на основной обтекающий лопатку газовый поток, дальнейшему повышению давления и к увеличению длительности теплового воздействия (охлаждения) на основной поток, интенсивность торможения которого возрастает. Силовое воздействие на поверхность увеличивается также за счет силы реакции струи выдуваемого газа. Возникшая дополнительная поперечная сила, действующая на нижнюю (вогнутую) поверхность рабочей лопатки, при неизменной силе давления на ее выпуклую поверхность, которая обусловлена только воздействием набегающего потока в межлопаточном пространстве, оказывается значительной и может в 1,5–2,5 раза превысить силу давления на поверхность рабочей лопатки при отсутствии локального выдува плоской газовой струи. В обоих случаях поперечная сила определялась по расчетному распределению давления вдоль поверхности лопатки (рис. 4 и 6) с использованием формул приближенного интегрирования, учитывающих геометрию разностной сетки. Это увеличение поперечной силы приводит к соответствующему увеличению крутящего момента на валу турбины (в 1,5–2 раза), а значит, и ее мощности [1, 2, 4].

Мощность турбины прямо пропорциональна температуре газа на входе в турбину и зависит от перепада давлений на входе в турбину и на выходе из нее [1, 2]. Поскольку поперечная сила, формирующая крутящий момент, зависит от силы давления на нижнюю поверхность рабочей лопатки, постольку перепад давлений может быть увеличен, а темпера-

тура газа на входе в турбину может быть понижена, что означает появление возможности соответствующего уменьшения расхода газа (топлива). Это свидетельствует о том, что если мощность турбины оставить неизменной, то можно уменьшить расход генераторного газа или расход топлива и тем самым повысить экономичность и КПД РД.

Следует также отметить, что одним из важных показателей, от которого зависит значение поперечной силы, является разность температур выдуваемого через поверхность холодного газа и высокотемпературного основного газового потока, при увеличении которой растет дополнительная поперечная сила. Расчеты показали, что снижение температуры охлаждающего газа на 30–35% может привести к увеличению поперечной силы на 18–23% при одних и тех же условиях. Увеличение скорости выдува холодного газа также приводит к росту поперечной силы. Если, например, скорость выдува увеличить на 21,5%, то относительная поперечная сила, приложенная к поверхности, возрастет на 22,3%. Для снижения температуры выдуваемого через поверхность лопатки газа может быть применен газо-жидкостный теплообменник, использующий топливо РД, и другие способы [1, 2, 3].

В одном из вариантов расчетов при условиях, отмеченных выше, получена дополнительная поперечная сила на поверхности лопатки, превышающая поперечную силу, формирующуюся на поверхности в отсутствие выдува, в 1,9 раза. Таким образом, мощность турбины можно увеличить почти пропорционально при том же расходе газа, а при сохранении прежней мощности – уменьшить расход газа (топлива) на 20–25%.

Выявленное снижение силы трения на нижней поверхности лопатки при выдуве охлаждающего газа (см. рис. 5) позволит уменьшить потери давления при движении разогретого газа через турбину и тем самым повысить ее КПД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим, что разработанные математические модели и метод позволяют выполнять численные расчеты газодинамических процессов обтекания поверхностей лопатки турбины, сопел и других модулей РД при локальном выдуве охлаждающего газа через поверхность в основной высокотемпературный, высокоскоростной поток вязкого, теплопроводного газа при изменении числа Рейнольдса, свойств газов, материала конструкции. Полученные результаты позволили установить влияние скорости и температуры выдуваемого газа, а также числа Маха  $M_\infty$  основного потока разогретого газа на распределение скорости в потоке, изменение давления и напряжения трения вдоль поверхности. Выявлены особенности структуры полей параметров в приповерхностном слое. Показано, что при определенных значениях параметров основного потока и выдуваемого газа на обтекаемой поверхности лопатки возникает дополнительная область повышенного давления. В результате в 1,5–2,5 раза увеличивается поперечная сила, приложенная к лопатке, и вращающий момент на валу турбины. Это позволит либо увеличить мощность турбины, либо при заданной мощности снизить расход газа (топлива) на 15–25%, то есть повысить экономичность и КПД РД. Выполнено сравнение результатов с имеющимися решениями модельных задач [7, 10, 14], с экспериментальными данными, полученными в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, и приведенными также в [6, 8, 14], которое позволило установить их приемлемую сходимость.

## Список используемых источников

1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 461 с.
2. Швец И.Т., Дыбан Е.П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. – Киев: Наукова думка, 1974. – 488 с.

3. Математическое моделирование тепловых и газодинамических процессов при проектировании летательных аппаратов / В.В. Горский, Е.В. Ватолина, А.В. Братчев и др.; под ред. В.В. Горского. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2011. – 212 с.

4. *Сенучи З., Бенамед М.* Численное моделирование влияния тангенциальной щели вдува на эффективность пленочного охлаждения для асимметричной лопатки турбины // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 5. – С. 749–763.

5. *Гюлайлиа А., Харси А., Хамиду М.К.* Моделирование эффективности пленочного охлаждения передней кромки лопатки через профилированные сужающиеся отверстия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 33–44.

6. *Коваленко Н.Д.* Возмущения сверхзвукового потока при массотеплоподводе. – Киев: Наукова думка, 1980. – 224 с.

7. Взаимодействие газочапельной турбулентной струи и спутного скоростного высокотемпературного потока газа / Д.В. Садин, А.Н. Добролюбов, В.П. Зюзликов и др. // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 85–94.

8. *Довгаль А.В., Занин Б.Ю., Сорокин А.М.* Реакция осесимметричного отрывного течения на пространственно локализованное возмущение потока // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 6. – С. 835–841.

9. *Низовцев В.М., Никитин К.В.* Численное моделирование процессов теплового и силового нагружения элементов поверхностей сопел реактивных двигателей при локальном массотеплоподводе к потоку // Сб. статей III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники», 14–15 декабря 2016 года. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – Т. 2. – С. 205–210.

10. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

11. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 421 с.

12. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках / под ред. проф. В.Н. Емельянова, д-ра физ.-мат. наук К.Н. Волкова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 416 с.

13. *Садин Д.В.* О жесткости систем уравнений в частных производных, описывающих движения гетерогенных сред // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 11. – С. 43–53.

14. *Волков К.Н., Емельянов В.Н.* Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 464 с.

Э.Р. Дашкин

## КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В МАТРИЧНЫХ ПРИЁМНИКАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Предложена новая комплексная математическая модель обрабатываемых в оптико-электронных системах (ОЭС) специального назначения (СН) сигналов космических аппаратов (КА), отличающаяся от известных моделей сигналов тем, что в ней учитывается процедура считывания изображений с оптического приёмника в виде матричного приёмника с зарядовой связью (МПЗС), искажающая исходное изображение.

Ключевые слова: модель сигнала космического объекта, матричный фотоприёмник, шум оптического приёмника, обработка оптических изображений.

### ВВЕДЕНИЕ

В развитии КА присутствует тенденция к их уменьшению [1, 2], помимо этого важным направлением развития космических систем является их защищенность за счет технологического снижения заметности [3]. Эти тенденции приводят к снижению блеска КА и соответственно уменьшению отношения сигнал/шум, что затрудняет обнаружение КА ОЭС СН [4, 5, 6].

Для разрешения возникшей проблемной ситуации необходимо разработать модели сигналов и алгоритмы обработки изображений, которые позволили бы повысить значение отношения сигнал/шум и тем самым повысить качество обнаружения КА ОЭС СН.

В данной публикации предлагается разработать модели сигналов, которые учитывают особенности регистрации изображений оптическими приёмниками, применяемыми в ОЭС СН. Модели должны учитывать ограничения используемых оптических приёмников с целью снижения внутреннего шума приёмника, а также они должны позволить синтезировать адаптивные алгоритмы обработки изображений, учитывающие не только среднее значение обрабатываемого сигнала, но и его случайную составляющую. Новые модели должны обеспечить применение многоуровневого квантования при межкадровой обработке в отличие от применяемого в данный момент межкадрового вычитания [7].

В качестве датчиков изображений в ОЭС СН используются МПЗС [8]. Разработку моделей обрабатываемых сигналов, снимаемых с оптических приёмников, целесообразно провести применительно к указанному типу преобразователя «свет – сигнал». Применение МПЗС вносит существенный вклад в качественные характеристики обнаружения и оценивания сигналов КА за счет изменения характеристик сигналов и шумов в процессе преобразования «свет – сигнал».

В то же время МПЗС присущи физические явления, ограничивающие возможности качественного преобразования «свет – сигнал». Некоторые из них приводят к потерям электронов, составляющих фототок. Потери электронов происходят как в процессе накопления заряда потенциальной ямы, так и при его транспортировке к выходу МПЗС [9].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ МАТРИЧНОГО ПРИЁМНИКА С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Оценим потери электронов (составляющих фототок), происходящие в процессе считывания изображения кадра. Будем считать, что МПЗС содержит  $P$  строк и  $N$  столбцов. Обозначим  $\vec{u}_i^T = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iN}]$ ,  $i = \overline{1, P}$ , вектор-строку, элементами которой являются величины



зарядов, возникающих в ячейках в результате накопления. В соответствии с рис. 1 параллельный аналоговый регистр осуществляет преобразование элементов вектора  $\bar{u}_i$  при каждом сдвиге снимаемого изображения. Первая верхняя строка должна быть передвинута  $P-1$  раз, вторая строка –  $P-2$  раза, третья –  $P-3$  раза и т.д. до  $(P-1)$ -й строки, которая сдвигается всего один раз. Строка с номером  $P$  не сдвигается вниз.

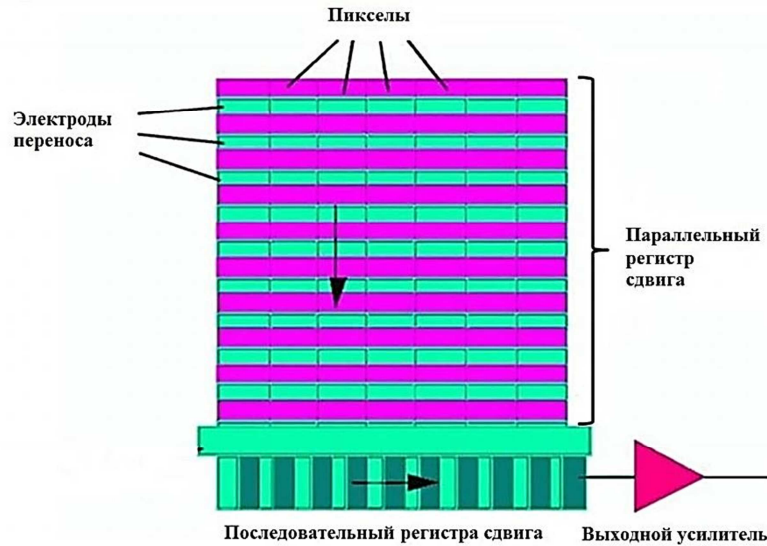


Рис. 1. Полнокадровый МПЗС

Описанную процедуру сдвига изображения кадра можно рассматривать как результат фильтрации каждой строки изображения в соответствующем фильтре. В результате выполнения указанной фильтрации вектор-строки  $\bar{u}_i, i = \overline{1, P}$ , преобразуются в вектор-строки  $\bar{\zeta}_i, i = \overline{1, P}$ , по следующему правилу:

$$\begin{cases} \bar{\zeta}_1 = \mathbf{G}_{P-1} \bar{u}_1, \\ \bar{\zeta}_2 = \mathbf{G}_{P-2} \bar{u}_2, \\ \dots \dots \dots, \\ \bar{\zeta}_{P-1} = \mathbf{G}_1 \bar{u}_{P-1}, \\ \bar{\zeta}_P = \bar{u}_P, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{G}_i$  – соответствующие диагональные матрицы весовых коэффициентов фильтра  $\forall i = \overline{1, P}$  размера  $N \times N$ . Заметим, что матрицы весовых коэффициентов  $\mathbf{G}_i$  могут быть представлены в виде соответствующих произведений матриц и имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{P-1} = \sum_{l=1}^{P-1} \mathbf{D}_l, \\ \mathbf{G}_{P-2} = \sum_{l=2}^{P-1} \mathbf{D}_l, \\ \dots \dots \dots, \\ \mathbf{G}_2 = \mathbf{D}_{P-1} \mathbf{D}_{P-2}, \\ \mathbf{G}_1 = \mathbf{D}_{P-1}, \\ \mathbf{G}_0 = \mathbf{I}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{D}_l$  – диагональная матрица весовых коэффициентов фильтра размера  $N \times N$  с элементами  $d_{ij}$ , равными коэффициентам передачи.

Систему уравнений (1) удобно записать с помощью матричного уравнения

$$\bar{\xi} = \mathbf{G}\bar{\mathbf{u}}, \quad (3)$$

в котором

$$\begin{aligned} \bar{\xi}^T &= [\bar{\xi}_1^T, \bar{\xi}_2^T, \dots, \bar{\xi}_P^T], \\ \bar{\mathbf{u}}^T &= [\bar{\mathbf{u}}_1^T, \bar{\mathbf{u}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{u}}_P^T], \\ \mathbf{G} &= \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^{P-1} \mathbf{D}_l & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 \\ 0 & \sum_{l=2}^{P-1} \mathbf{D}_l & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{D}_{P-1}\mathbf{D}_{P-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{D}_{P-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Последовательный сдвиг каждого из элементов изображения строки матрицы также может рассматриваться как результат обработки в фильтре  $\mathbf{F}$  размера  $N \times N$ , матрица весовых коэффициентов которого имеет вид

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^{N-1} f_l & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 \\ 0 & \sum_{l=2}^{N-1} f_l & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & f_{N-1}f_{N-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & f_{N-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Это означает, что на выходе МПЗС получим вектор изображений в соответствии с выражением

$$\bar{\xi} = (\mathbf{I} \otimes \mathbf{F}) \bar{\xi} = [(\mathbf{I} \otimes \mathbf{F}) \mathbf{G}] \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{H}_{\Pi} \bar{\mathbf{u}}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{H}_{\Pi} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \sum_{l=1}^{P-1} \mathbf{D}_l & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 \\ 0 & \mathbf{F} \sum_{l=2}^{P-1} \mathbf{D}_l & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{F} \mathbf{D}_{P-1} \mathbf{D}_{P-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{F} \mathbf{D}_{P-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \mathbf{F} \end{bmatrix}.$$

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА, СНИМАЕМОГО С МАТРИЧНОГО ПРИЁМНИКА С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Коэффициенты фильтров  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{D}_l$ ,  $l = \overline{1, P}$ , матрицы  $\mathbf{H}_{\Pi}$  для всех МПЗС будут различными, их можно считать случайными величинами, а сами фильтры – фильтрами со случайными передаточными характеристиками. Для каждой конкретной МПЗС имеем неслучайную пере-

даточную характеристику  $\mathbf{H}_\Pi$  фильтра. При этом можно утверждать, что  $\mathbf{H}_\Pi$  является невырожденной матрицей и имеет обратную матрицу:

$$\mathbf{H}_\Pi^{-1} = [(\mathbf{I} \otimes \mathbf{F}) \mathbf{G}]^{-1} = \mathbf{G}^{-1} (\mathbf{I} \otimes \mathbf{F})^{-1} = \mathbf{G}^{-1} (\mathbf{I} \otimes \mathbf{F}^{-1}).$$

Поскольку вектор изображения  $\vec{\mathbf{u}}^T = [\vec{\mathbf{u}}_1^T, \vec{\mathbf{u}}_2^T, \dots, \vec{\mathbf{u}}_p^T]$  представляет собой совокупность сигналов, создаваемых техногенными космическими объектами  $\vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}}^T = [\vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}1}^T, \vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}2}^T, \dots, \vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}P}^T]$ , звездным фоном  $\vec{\mathbf{s}}_3^T = [\vec{\mathbf{s}}_{31}^T, \vec{\mathbf{s}}_{32}^T, \dots, \vec{\mathbf{s}}_{3P}^T]$ , фоном ночного неба  $\vec{\mathbf{n}}^T = [\vec{\mathbf{n}}_1^T, \vec{\mathbf{n}}_2^T, \dots, \vec{\mathbf{n}}_p^T]$ , шумами МПЗС  $\vec{\mathbf{w}}^T = [\vec{\mathbf{w}}_1^T, \vec{\mathbf{w}}_2^T, \dots, \vec{\mathbf{w}}_p^T]$ , выражение (4) можно записать следующим образом:

$$\vec{\xi} = [(\mathbf{I} \otimes \mathbf{F}) \mathbf{G}] \vec{\mathbf{u}} + \vec{\mathbf{v}} = \mathbf{H}_\Pi \vec{\mathbf{u}} + \vec{\mathbf{v}} = \mathbf{H}_\Pi \vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}} + \mathbf{H}_\Pi \vec{\mathbf{s}}_3 + \mathbf{H}_\Pi \vec{\mathbf{n}} + \mathbf{H}_\Pi \vec{\mathbf{w}} + \vec{\mathbf{v}}, \quad (5)$$

где  $\vec{\mathbf{v}}$  – вектор выборок шумов аппаратуры обвязки, выходного усилителя и аналого-цифрового преобразователя.

Рассмотрим статистические характеристики каждого из компонентов, входящих в выражение (5). Случайные векторы  $\vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}}$ ,  $\vec{\mathbf{s}}_3$ ,  $\vec{\mathbf{n}}$  и  $\vec{\mathbf{w}}$  подчиняются нормальному распределению вероятностей со следующими числовыми характеристиками:

$$\begin{aligned} M[\vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}}] &= \vec{\mathbf{m}}_{\text{TKO}}; \quad M[\vec{\mathbf{s}}_3] = \vec{\mathbf{m}}_3; \quad M[\vec{\mathbf{n}}] = \vec{\mathbf{m}}_n; \quad M[\vec{\mathbf{w}}] = \vec{\mathbf{m}}_w; \\ M[(\vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}} - \vec{\mathbf{m}}_{\text{TKO}})(\vec{\mathbf{s}}_{\text{TKO}} - \vec{\mathbf{m}}_{\text{TKO}})^T] &= \mathbf{K}_{\text{TKO}}; \quad M[(\vec{\mathbf{s}}_3 - \vec{\mathbf{m}}_3)(\vec{\mathbf{s}}_3 - \vec{\mathbf{m}}_3)^T] = \mathbf{K}_3; \\ M[(\vec{\mathbf{s}}_n - \vec{\mathbf{m}}_n)(\vec{\mathbf{s}}_n - \vec{\mathbf{m}}_n)^T] &= \mathbf{K}_n; \quad M[(\vec{\mathbf{s}}_w - \vec{\mathbf{m}}_w)(\vec{\mathbf{s}}_w - \vec{\mathbf{m}}_w)^T] = \mathbf{K}_w; \\ M[\vec{\mathbf{v}}] &= \vec{\mathbf{0}}; \quad M[\vec{\mathbf{v}}\vec{\mathbf{v}}^T] = \mathbf{K}_v, \end{aligned}$$

где  $M[\cdot]$  – соответствующие математические ожидания;

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_n &= \text{diag}[k_{nii}]_{i=1}^{NP}; \\ \mathbf{K}_w &= \text{diag}[k_{wii}]_{i=1}^{NP}; \\ \mathbf{K}_v &= \text{diag}[k_{vii}]_{i=1}^{NP}. \end{aligned}$$

Предполагается, что в процессе вычислений в спецпроцессоре обработки будет добавляться дополнительный шум, возникающий за счет влияния эффекта конечной разрядности чисел на качество выполнения арифметических операций и конечного представления весовых коэффициентов цифровых фильтров [10].

Анализируя выражение (5), замечаем, что фильтр  $\mathbf{H}_\Pi$  искажает исходное изображение. Можно оценить влияние этих искажений на качественные характеристики оценивания координатной и астрофотометрической информации. Для этого достаточно задать векторы сигналов, соответствующих изображениям целей или звезд, и определить, как изменяются векторы сигналов в процессе считывания. Тогда вектор  $\vec{\mathbf{u}}$  можно представить в виде суммы векторов сигналов, соответствующих сигналам звезд  $\vec{\mathbf{s}}_{3i}$ ,  $i = \overline{1, \Phi}$ , векторов сигналов, определяемых сигналами целей  $\vec{\mathbf{s}}_{\text{KA}j}$ ,  $j = \overline{1, \tau}$ , векторов сигналов, определяемых фоном неба  $\vec{\mathbf{n}}$  и шумами МПЗС  $\vec{\mathbf{w}}$ :

$$\vec{\mathbf{u}} = \sum_{j=1}^{\tau} \vec{\mathbf{s}}_{\text{KA}j} + \sum_{i=1}^{\Phi} \vec{\mathbf{s}}_{3i} + \vec{\mathbf{n}} + \vec{\mathbf{w}}. \quad (6)$$

Уточним модели сигналов звезд и целей, входящих в выражение (6).

На рис. 2 показан вид изображений звезд и КА, формируемых на выходах МПЗС. Площадь, занимаемая изображением, и форма определяются положением центра тяжести изображения относительно пиксела и временем накопления. Обычно оно не превышает размера  $2 \times 2$ , но в случае ярких звезд и большого времени накопления может наблюдаться явление блюминга, описанное выше.

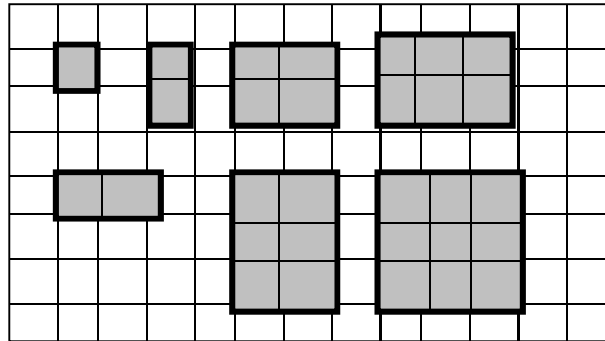


Рис. 2. Вид изображений звезд и КА в плоскости МПЗС

Как следует из рис. 2., сигнал КА или звезды может быть записан в виде блочного вектора  $\vec{s}_{КАj}$  или  $\vec{s}_{3i}$ , который имеет следующий вид:

$$\vec{s}_i^T = \left[ \underbrace{\vec{0}^T}_{N1i}, \underbrace{\vec{s}_{N2i}^T, \dots, \vec{s}_{N1i+N2i}^T}_{N2i}, \underbrace{\vec{0}^T}_{N3i} \right], \quad (7)$$

$$\text{где } \vec{s}_{ij}^T = \left[ \underbrace{\vec{0}^T}_{P1i}, \underbrace{s_{i,P1+1}, \dots, s_{i,P1+P2i}}_{P2i}, \underbrace{\vec{0}^T}_{P3i} \right];$$

$$N_i = N1i + N2i + N3i;$$

$$P_i = P1i + P2i + P3i.$$

Запись сигнала в виде выражение (7) позволяет получить результат считывания изображения объекта с номером  $i$  с МПЗС в виде

$$\vec{s}_{\xi i} = [(\mathbf{I} \otimes \mathbf{F}) \mathbf{G}] \vec{s}_i. \quad (8)$$

Анализируя вид матрицы  $[(\mathbf{I} \otimes \mathbf{F}) \mathbf{G}]$ , приходим к выводу, что наибольшие искажения претерпевают изображения, которые находятся в верхнем левом углу изображения. В работе [11] показано, какие вычислительные процедуры можно применить для устранения указанных искажений.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАНТОВАННОГО СИГНАЛА, СНИМАЕМОГО С МАТРИЧНОГО ПРИЁМНИКА С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Зная амплитудную характеристику МПЗС, можно определить число разрядов аналого-цифрового преобразователя, осуществляющего преобразование совокупности сигналов КА, звезд, фона неба и темнового шума в цифровую форму. Рассмотрим вопрос о том, как следует выбирать число разрядов представления отсчетов сигналов звезд и КА для преобразования напряжения  $u_{ij}$ , считываемого с ячейки с номером  $i, j$  ( $i = 1, P$   $j = 1, N$ ) МПЗС. На выходе

аналого-цифрового преобразователя в двоичной системе исчисления оно может быть представлено в виде ряда:

$$u_{ij} \cong \sum_{k=0}^{p-1} u_{ijk} 2^k, \quad (9)$$

где  $u_{ijk}$  – можно рассматривать как нормально распределенную случайную величину с математическим ожиданием  $m_{ijk} = M(u_{ijk})$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{ijk}^2 = M[(u_{ijk} - m_{ijk})^2]$ .

В дальнейшем удобно представить выражение (9) в виде скалярного произведения:

$$u_{ij} \cong \sum_{k=0}^{p-1} u_{ijk} 2^k = \bar{\mathbf{u}}_{ij}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \quad (10)$$

где  $\bar{\mathbf{u}}_{ij}^T = [u_{ij0}, u_{ij1}, \dots, u_{ij,p-1}]$  – вектор коррелированных гауссовских случайных величин, с вектором математических ожиданий  $\bar{\mathbf{m}}_{ijk} = M[\bar{u}_{ijk}]$  и корреляционной матрицей  $\mathbf{K}_{ijk} = M[\bar{u}_{ijk} \bar{u}_{ijk}^T]$ ,  $\bar{\boldsymbol{\phi}}^T = [2^0, 2^1, \dots, 2^{p-1}]$ .

Векторы напряжений  $\bar{\mathbf{u}}^T = [\bar{\mathbf{u}}_1^T, \bar{\mathbf{u}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{u}}_P^T]$ ,  $\bar{\mathbf{u}}_i^T = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iR}]$ , снимаемых с МПЗС (кадр изображения), с помощью выражения (9) можно выразить через векторы  $\bar{\mathbf{u}}_{ij}$ , полученные в результате преобразования в аналого-цифровом преобразователе аналоговых выборок. Подставляя выражение (10) в вектор  $\bar{\mathbf{u}}_i^T$ , находим  $\bar{\mathbf{u}}_i^T = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iR}] = [\bar{\mathbf{u}}_{i1}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \bar{\mathbf{u}}_{i2}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{iR}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}]$ , а это, в свою очередь, позволяет записать  $\bar{\mathbf{u}}$  в виде вектора тех же размеров, но выраженного через компоненты  $u_{ijk}$  и вектор  $\bar{\boldsymbol{\phi}}$ , то есть

$$\bar{\mathbf{u}}^T = [\bar{\mathbf{u}}_{11}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \bar{\mathbf{u}}_{12}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{1R}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \bar{\mathbf{u}}_{21}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \bar{\mathbf{u}}_{22}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{2R}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{P1}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \bar{\mathbf{u}}_{P2}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{PR}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}]. \quad (11)$$

Последнее выражение для  $\bar{\mathbf{u}}$  представим в виде матричного произведения:

$$\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{F}_k \bar{\mathbf{u}}_{PRV}, \quad (12)$$

где  $\bar{\mathbf{u}}_{PRV}^T$  – вектор размера  $1 \times PRV$ ,  $\bar{\mathbf{u}}_{PRV}^T = [\bar{\mathbf{u}}_{11}^T, \bar{\mathbf{u}}_{12}^T, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{1R}^T, \bar{\mathbf{u}}_{21}^T, \bar{\mathbf{u}}_{22}^T, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{2R}^T, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{P1}^T, \bar{\mathbf{u}}_{P2}^T, \dots, \bar{\mathbf{u}}_{PR}^T]$ ;

$\mathbf{F}_k$  – блочная диагональная матрица размера  $PN \times PNV$ :

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{\phi}}^T & \bar{\mathbf{0}}^T & \dots & \bar{\mathbf{0}}^T \\ \bar{\mathbf{0}}^T & \bar{\boldsymbol{\phi}}^T & \dots & \bar{\mathbf{0}}^T \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{\mathbf{0}}^T & \bar{\mathbf{0}}^T & \dots & \bar{\boldsymbol{\phi}}^T \end{bmatrix} = \mathbf{I} \otimes \bar{\boldsymbol{\phi}}.$$

Вектор математических ожиданий  $\bar{\mathbf{m}}_u$  и корреляционная матрица  $\mathbf{K}_u$  определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{m}}_u &= M[\bar{\mathbf{u}}] = M[\mathbf{F} \bar{\mathbf{u}}_{PRV}] = \mathbf{F} M[\bar{\mathbf{u}}_{PRV}] = \mathbf{F} \bar{\mathbf{m}}_{PRV}; \\ \mathbf{K}_u &= M[(\bar{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{m}}_u)(\bar{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{m}}_u)^T] = M[(\mathbf{F} \bar{\mathbf{u}}_{PRV} - \mathbf{F} \bar{\mathbf{m}}_{PRV})(\mathbf{F} \bar{\mathbf{u}}_{PRV} - \mathbf{F} \bar{\mathbf{m}}_{PRV})^T] = \\ &= \mathbf{F} M[(\bar{\mathbf{u}}_{PRV} - \bar{\mathbf{m}}_{PRV})(\bar{\mathbf{u}}_{PRV} - \bar{\mathbf{m}}_{PRV})^T]^T \mathbf{F}^T = \mathbf{F} \mathbf{K}_{PRV} \mathbf{F}^T. \end{aligned}$$

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В РЕЖИМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ

Сигналы целей в режиме обнаружения создаются совокупностью сигналов естественных космических объектов, то есть они представляют собой вектор  $\vec{s}_{КА}$  вида  $\vec{s}_{КА} = b_{КА} \sum_{i=1}^l \vec{G}_i$ , где  $b$  – случайная величина. Число слагаемых в сумме  $l$  определяется угловой скоростью цели. Размер вектора  $\vec{G}_i$  определяется звездной величиной  $m$  цели и временем накопления  $t_H$ .

На рис. 3 приведен вид сигнала цели, полученного в процессе формирования одного кадра (без учета его случайной составляющей). Предполагается, что цель движется равномерно и прямолинейно.

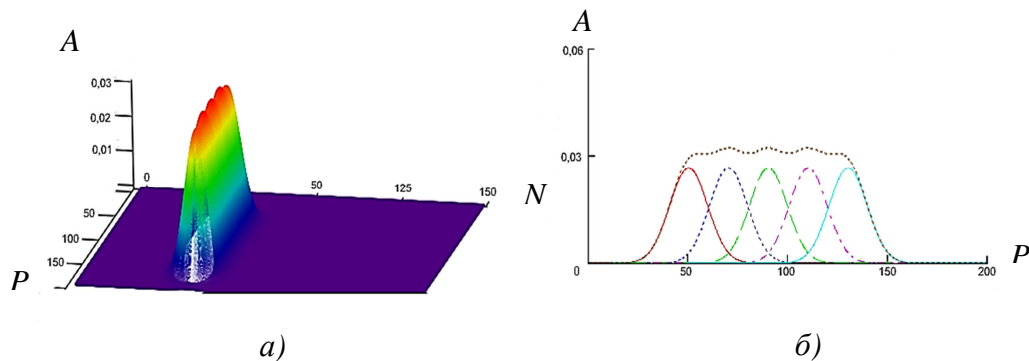


Рис. 3. Вид сигнала, полученного в процессе формирования одного кадра:  
а – трехмерный вид; б – двухмерных вид

На рис. 3,б показано, что сигнал цели формируется пятью гауссоидами, сдвинутыми друг относительно друга. На самом деле в указанном интервале времени будет бесконечное число гауссоид и при отсутствии шумов вершина получаемого импульса будет плоской.

Фон неба можно считать гауссовским полем, которое задается своими дискретными отсчетами за счет накопления в ячейках МПЗС. При этом в зависимости от значения  $t_H$  может рассматриваться равномерный или неравномерный фон неба. Шум МПЗС предполагается равномерным вследствие того, что он оценивается и нормируется в процессе подготовки к работе в тестовом режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная комплексная модель в отличие от существующих учитывает неэффективность переноса зарядов в МПЗС при считывании оптического кадра, а также случайную составляющую обрабатываемых сигналов. Кроме того, в структуру комплексной модели встроена модель квантованного сигнала.

Практическая ценность результатов, приведенных в публикации, заключается в возможности коррекции данных, снимаемых с МПЗС ОЭС СН, выборе размеров элемента дискретизации и числа уровней квантования сигналов КА и звездного фона для обеспечения требуемого качества цифровой обработки изображений, использовании комплексной модели для создания имитаторов сигналов, снимаемых с МПЗС. Комплексная модель позволит синтезировать адаптивные алгоритмы обнаружения КА с применением многоуровневого квантования при межкадровой обработке изображений.

### Список используемых источников

1. Малые космические аппараты информационного обеспечения / под ред. В.Ф. Фатеева. – М.: Радиотехника, 2010. – 320 с.
2. Инфраструктура малых космических аппаратов / под ред. В.Ф. Фатеева. – М.: Радиотехника, 2011. – 432 с.
3. Кулейко А. Мисти: спутники-невидимки в космосе // Новости космонавтики. – 2004. – Т. 14, № 6. – С. 50–53.
4. Фомин В.Н., Никитин В.М., Коломийцев Е.Г. Оптико-электронные астрофизические наблюдения в условиях помех: монография. – М.: Изд-во Московского университета, 2012. – 200 с.
5. Логунов С.В., Rogov Д.А., Чистяков С.В. Критериальные условия возможности наблюдения геостационарных спутников связи наземными оптическими средствами // Вестник воздушно-космической обороны. – М.: ВЭС ВКО, 2017. – № 1. – С. 44–48.
6. Оптимальная обработка зашумленных изображений в фотоприемнике с ограниченным динамическим диапазоном / В.Н. Фомин, В.М. Никитин, Е.Б. Жбаков, В.А. Сауткин, Е.К. Суязов. – М.: Изд-во Московского университета, 2012.
7. Обнаружение объектов на звездном фоне / Г.В. Левко, А.И. Бобровский, А.В. Морозов, А.К. Цыцулин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2016. – № 2. – С. 29–38.
8. Коломийцев Е.Г., Ляпоров В.Н., Осипов О.В. «Окно» как страж российского неба // Воздушно-космическая оборона. – 2015. – № 1. – С. 40–45.
9. Лазовский Л. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир. – URL: <http://www.autex.spb.ru/download/sensors/ccd.pdf> (дата обращения: 19.02.2017).
10. Дашкин Э.Р., Поляков В.В. Влияние эффекта конечной разрядности весовых коэффициентов адаптивных цифровых фильтров на качество обработки изображений при обнаружении малых техногенных объектов в наземных оптико-электронных системах специального назначения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652. – С. 33–39.
11. Дашкин Э.Р., Поляков В.В. Алгоритм компенсации ошибок, возникающих за счет считывания информации с матричного фотоприемник // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 220–225.

А.В. Барцевич,  
*кандидат техн. наук;*  
Э.Р. Дашкин;  
В.В. Поляков,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБА ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОМ КОМПЛЕКСЕ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Рассмотрена возможность практической реализации предложенного ранее способа обнаружения сигналов целей (элементов «космического мусора») в оптико-электронной системе в реальных условиях работы, а именно, при параметрической априорной неопределенности статистических характеристик обрабатываемых сигналов и неклассифицированных обучающих выборках. Приведены примеры работы отдельных алгоритмов.

Ключевые слова: околоземный космос, техногенные объекты, «космический мусор», оптико-электронный комплекс, обнаружение сигналов, параметрическая априорная неопределенность, статистические характеристики.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из важных научно-технических проблем в области космических исследований является проблема повышения эффективности контроля за элементами «космического мусора» (целями) в околоземном космосе, в том числе при работе систем связи и навигации. Ее решение требует, в частности, повышения достоверности обнаружения и точности оценивания параметров целей средствами обнаружения, в том числе оптико-электронной системой (ОЭС). Основные способы повышения достоверности обнаружения и точности оценивания параметров сигналов целей в ОЭС были рассмотрены в [1 – 3]. Так, в [1] обоснована необходимость адаптивного обнаружения сигналов целей в ОЭС при априорной неопределенности (АН) статистических характеристик (СХ) обрабатываемых сигналов в виде гауссовых случайных величин (ГСВ), снимаемых с матричных некогерентных приёмников, рассмотрен в общем виде способ решения этой задачи. Полученные в [1] результаты обобщены на более общий случай решения задачи адаптивного обнаружения-измерения сигналов (впервые она была сформулирована в [2]) целей в ОЭС при АН СХ [3]. Реализация в ОЭС результатов, полученных в [1, 3], возможна при использовании различных математических методов, адекватных условиям применения и техническому облику ОЭС [4]. В работе [5] был предложен более эффективный способ обнаружения целей в ОЭС, позволяющий учитывать в обработке не только среднего значения обрабатываемых сигналов целей, но и случайные составляющие. Практическая реализация предложенного способа требует обеспечения работы ОЭС при параметрической АН СХ [6, 7], когда необходимо дополнительно применять специальные алгоритмы, формирующие оценки СХ сигналов целей, естественных космических объектов (ЕО) и интегрального помехового фона (ПФ) при работе ОЭС. Рассмотрим, как можно решить эту задачу на практике с помощью методов статистического оценивания.



## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В поле зрения ОЭС находится априорно неизвестное число разрешимых целей и ЕО  $n_l$  ( $l$  – номер цели или ЕО в поле зрения ОЭС) и ПФ. На обработку поступает входная сигнальная выборка

$$\xi_{ij}(t_k) = U_{ij}(t_k) + W_{ij}(t_k),$$

где  $\xi_{ij}(t_k)$ ,  $U_{ij}(t_k)$ ,  $W_{ij}(t_k)$  – соответственно суммарный сигнал, сигналы целей (ЕО) и ПФ в ячейке  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца приёмника в  $k$ -м кадре, формируемом в момент времени  $t_k$  ( $i = \overline{1, n_i}$ ,  $j = \overline{1, n_j}$ ,  $k = \overline{1, n_k}$ ), они являются ГСВ с числовыми характеристиками (ЧХ): математическими ожиданиями (МО)  $M_{\xi_{ij}}(t_k)$ ,  $M_{U_{ij}}(t_k)$ ,  $M_{W_{ij}}(t_k)$  и среднеквадратическими отклонениями (СКО)  $\sigma_{\xi_{ij}}(t_k)$ ,  $\sigma_{U_{ij}}(t_k)$ ,  $\sigma_{W_{ij}}(t_k)$ , для которых справедливо соответственно:

$$M_{\xi_{ij}}(t_k) = M\{\xi_{ij}(t_k)\} = M_{U_{ij}}(t_k) + M_{W_{ij}}(t_k);$$

$$M_{U_{ij}}(t_k) = M\{U_{ij}(t_k)\};$$

$$M_{W_{ij}}(t_k) = M\{W_{ij}(t_k)\};$$

$$\sigma_{\xi_{ij}}^2(t_k) = M\left\{\left[\xi_{ij}(t_k) - M_{\xi_{ij}}(t_k)\right]^2\right\} = \sigma_{U_{ij}}^2(t_k) + \sigma_{W_{ij}}^2(t_k);$$

$$\sigma_{U_{ij}}^2(t_k) = M\left\{\left[U_{ij}(t_k) - M_{U_{ij}}(t_k)\right]^2\right\};$$

$$\sigma_{W_{ij}}^2(t_k) = M\left\{\left[W_{ij}(t_k) - M_{W_{ij}}(t_k)\right]^2\right\},$$

где  $M\{\}$  – знак МО. Корреляция по времени между соответствующими элементами каждой из ГСВ  $\xi_{ij}(t_k)$ ,  $U_{ij}(t_k)$ ,  $W_{ij}(t_k)$ , а также между аналогичными элементами ГСВ  $U_{ij}(t_k)$  и  $W_{ij}(t_k)$  как правило отсутствует.

При анализе выборок  $\xi_{ij}(t_k)$ ,  $k = \overline{1, n_k}$ , требуется обнаружить максимально возможное число целей (ЕО)  $\hat{n}_l \leq n_l$  с вычислением точечной оценки  $\hat{r}_l$  вектора неизвестных параметров сигнала каждой  $l$ -й цели (ЕО)  $\vec{r}_l$ . Целесообразный состав вектора  $\vec{r}_l$ , критерии эффективности и порядок формирования оценок  $\hat{r}_l$ , оптимальное байесовское правило совместного обнаружения-измерения сигналов  $U_{ij}(t_k)$ , выражение для среднего риска, критерии и общие схемы алгоритмов обнаружения-измерения сигналов целей (ЕО) на фоне сигналов ПФ приведены в [3].

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Решение поставленной задачи требует знания ЧХ сигналов целей (ЕО) и ПФ  $M_{U_{ij}}(t_k)$ ,  $M_{W_{ij}}(t_k)$ ,  $\sigma_{U_{ij}}(t_k)$ ,  $\sigma_{W_{ij}}(t_k)$ , а также дополнительных априорно неизвестных параметров, определяющих «размеры» каждого из сигналов для каждого  $k$ -го кадра [2, 3]. Поэтому решаемая задача является задачей обнаружения-измерения при параметрической АН. Ее решение осложнено нестационарностью ЧХ целей (ЕО) и ПФ по пространству (при  $k = \text{const}$ ,  $i = \text{var}$ ,  $j = \text{var}$ ) и времени (при  $k = \text{var}$ ,  $i = \text{const}$ ,  $j = \text{const}$ ). Оценки этих ЧХ можно формировать

при работе ОЭС по неклассифицированным обучающим выборкам  $\xi_{ij}(t_k)$ , содержащим смесь полезного  $U_{ij}(t_k)$  и мешающего  $W_{ij}(t_k)$  сигналов [8]. Это требует [при известных плотностях распределения выборок  $\xi_{ij}(t_k)$  проверяемых гипотез] применения метода расширенного пространства оценок [8], а именно, дополнительного применения алгоритмов оценивания ЧХ сигналов целей, ЕО и ПФ при работе ОЭС. При этом, несмотря на наличие качественных методов восстановления зашумленных изображений [9], необходимость оценивать в реальном масштабе времени МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$  и  $M_{U_{ij}}(t_k)$  требует применения более простых, но допустимых по точности алгоритмов оценивания, которые могут строиться на основе разных статистических методов [10, 11].

Решение задачи обнаружения-измерения сигналов целей в серии из  $n_k$  кадров можно обеспечить путем поэтапного внутрикадрового обнаружения-измерения сигналов целей и ЕО на ПФ (рис. 1) с последующим выделением сигналов целей на фоне сигналов ЕО при измерении сигналов целей в серии из  $n_k$  кадров (при этом дополнительно применяются алгоритм, предложенный в [5]).

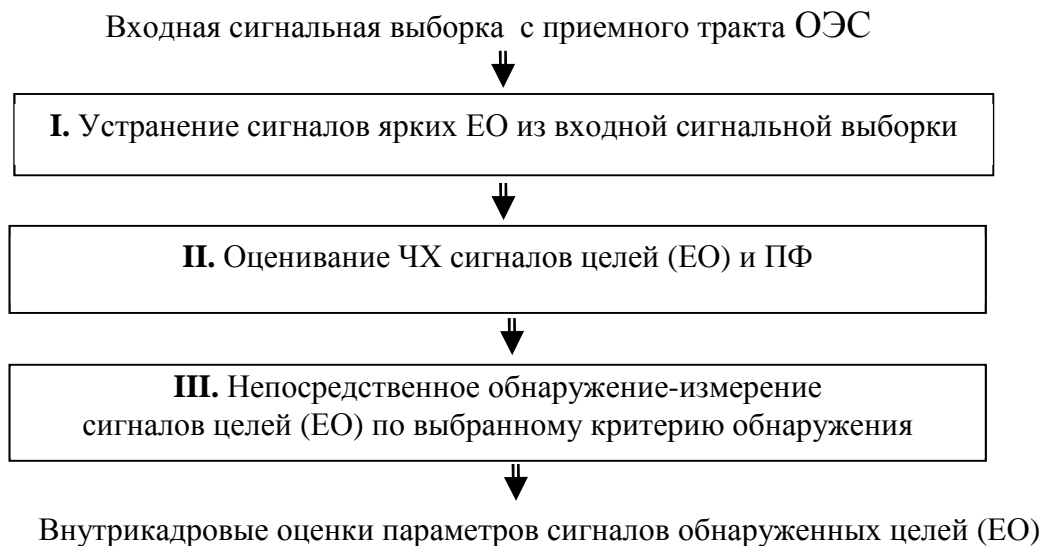


Рис. 1. Внутрикадровое обнаружение-оценивание сигналов целей (ЕО)

Предварительное устранение из обработки сигналов ярких ЕО, входящих в выборку  $\xi_{ij}(t_k)$ , осуществляется статистическими методами исключения из обработки резко выделяющихся сигнальных выбросов (на основе критериев Анскомба, Граббса или иных критериев на основе адаптации) [11, 12], реализуемыми итерационно или с помощью более простых пороговых процедур, требующих значительно меньших вычислений, но существенно уступающих первым по точности [в последнем случае нужно применять соответствующие пороги, рассчитанные предварительно эвристически для разных условий, либо использовать дополнительный комплекс оборудования, оценивающий уровень сигналов ЕО (целей) и ПФ]. В итоге формируется скорректированная выборка  $\xi'_{ij}(t_k)$ , по которой вычисляются искомые оценки. Это значительно снижает объем вычислений при проверке критерия обнаружения [1, 3] по всему полю ячеек. На практике наиболее важно оценить ЧХ  $M_{W_{ij}}(t_k)$  и  $\sigma_{W_{ij}}(t_k)$ . Несмотря на трудности вычисления в одном кадре обратимой матрицы, состоящей из дисперсий  $\sigma_{W_{ij}}^2(t_k)$ , это возможно с применением методов безошибочных вычислений, распараллеливания вычислений увеличения разрядности спецпроцессора. При этом алгоритмы на основе метода Анскомба и медианных методов позволяют с большей точностью по

сравнению с алгоритмами, приведенными в [12], оценивать ЧХ сигналов стационарного и нестационарного по пространству ПФ, а также сигналов целей (ЕО). Для алгоритмов на основе метода Анскомба в этом случае на втором этапе (см. рис. 1) для МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$  находятся оценки:

$$\hat{M}_{W_i}(t_k) = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{j=1}^{n_j} \xi_{ij}(t_k), \forall_i = \text{const}; \quad (1)$$

$$\hat{M}_{W_j}(t_k) = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} \xi_{ij}(t_k), \forall_j = \text{const}; \quad (2)$$

$$\hat{M}_{W_{ij}}(t_k) = \sqrt{\hat{M}_{W_i}(t_k) \hat{M}_{W_j}(t_k)}, \forall_{i,j}, \quad (3)$$

а для СКО  $\sigma_{W_{ij}}(t_k)$  находится либо единая для всего кадра оценка:

$$\hat{\sigma}_{W_{ij}}^2(t_k) = \frac{1}{n_{ij} - 1} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} [\xi_{ij}(t_k) - \hat{M}_{W_{ij}}(t_k)], \forall_{i,j}, \quad (4)$$

либо оценка вида

$$\hat{\sigma}_{W_i}^2(t_k) = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{j=1}^{n_j} [\xi_{ij}(t_k) - \hat{M}_{W_i}(t_k)], \forall_i = \text{const}; \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_{W_j}^2(t_k) = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} [\xi_{ij}(t_k) - \hat{M}_{W_j}(t_k)], \forall_j = \text{const}; \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_{W_{ij}}^2(t_k) = \sqrt{\hat{\sigma}_{W_i}^2(t_k) \hat{\sigma}_{W_j}^2(t_k)}, \forall_{i,j}. \quad (7)$$

Оценки (1) – (7) эффективны при больших значениях параметров  $n_i$  и  $n_j$ . В этом случае они значительно точнее оценок  $\hat{M}_{W_{ij}}(t_k)$  для МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$  ПФ, близкого к стационарному, описанных в [13], формируемых по следующим правилам:

$$\hat{M}_W(t_k) = \frac{1}{n_{ij} - 1} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \xi_{ij}(t_k) = \text{const}, \forall_{i,j}; \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_{W_{ij}}^2(t_k) = \frac{1}{n_{ij} - 1} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} [\xi_{ij}(t_k) - \hat{M}_{W_{ij}}(t_k)], \forall_{i,j}, \quad (9)$$

Эффективность алгоритма по выражениям (1) – (7) оценивалась методом статистических испытаний [13] для основного оцениваемого параметра – МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$ , описываемого экспоненциальной функцией (для нестационарного по кадру ПФ), при заданных размерах приёмника в одном кадре ( $k = \text{const}$ ) по нескольким реализациям (для снижения влияния случайных составляющих на качество оценки). Значения МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$  и случайной составляющей ПФ  $W_{ij}(t_k) - M_{W_{ij}}(t_k)$  изменялись в заданных пределах, соответствующих реальным значениям сигналов ПФ. По выборке  $\xi_{ij}(t_k)$  формировались оценки (1) – (3), качество которых оценивалось интегральной оценкой  $\sum \Delta W^2$  вида

$$\sum \Delta W^2 = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} [\hat{M}_{W_{ij}}(t_k) - M_{W_{ij}}(t_k)]^2. \quad (10)$$

Полученные результаты показали, что оценка  $\hat{M}_{W_{ij}}(t_k)$  позволяет, в отличие от оценки  $\hat{M}_W(t_k)$ , хотя и недостаточно точно, оценивать тренд МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$  по пространству. Обе оценки являются смещенными из-за наличия в выборке  $\xi_{ij}(t_k)$  сигналов  $U_{ij}(t_k)$ , не все из ко-

торых удастся предварительно отсеять. Точность оценки  $\hat{M}_{w_{ij}}(t_k)$  по сравнению с оценкой  $\hat{M}_w(t_k)$  тем выше, чем более выражен тренд МО  $\hat{M}_{w_{ij}}(t_k)$ . Кроме того, скорость вычисления оценки  $\hat{M}_{w_{ij}}(t_k)$  не хуже скорости вычисления оценки  $\hat{M}_w(t_k)$ . Оценки по (1) – (3) эффективны при ярком ПФ, неравномерном по кадру. Для крупноформатных приёмников (при больших значениях параметров  $n_i$  и  $n_j$ ) точность оценок  $\hat{M}_{w_{ij}}(t_k)$  можно повысить вычислением их по малым выборкам, когда они формируются независимо в разных участках, на которые разбиваются столбцы (строки). Для точного оценивания ЧХ сигналов ПФ, а также сигналов целей (ЕО) применимы также методы наименьших квадратов, сплайнов (с полиномиальной или иной аппроксимацией тренда), ядерного планирования, ортогональных соседей, оценивания на основе ближайших соседей (ограниченных выборок), интерполяции методом «крекинга» и иные математические методы, позволяющие в том числе сохранять перепады. Оценки, полученные на их основе, формируются достаточно просто и хорошо теоретически исследованы. Во многих случаях допустимы по точности «медианные» методы, обеспечивающие хорошее быстроедействие и возможность оценивать «неплавные» сигналы [14]. Они позволяют также оценивать МО  $\hat{M}_{U_{ij}}(t_k)$ , что очень важно для практики работы ОЭС. По оценкам МО  $\hat{M}_{w_{ij}}(t_k)$  и  $\hat{M}_{U_{ij}}(t_k)$  можно формировать корреляционные матрицы сигналов целей (ЕО) и ПФ.

Эффективность вычисления оценок  $\hat{M}_{w_{ij}}(t_k)$  и  $\hat{M}_{U_{ij}}(t_k)$  «медианными» методами оценивалась методом статистических испытаний (Монте-Карло) [13] при тех же условиях, что и для алгоритма по методу Анскомба. Исследовались методы: среднего, медианы, двойной медианы, среднего медианы (в том числе с предварительным устранением из обработки резко выделяющихся сигнальных выбросов), усеченного среднего и усеченного среднего медианы. Из-за возможности обобщения результатов, полученных для одномерных алгоритмов, на двумерные алгоритмы, исследовался лишь случай обработки одномерной выборки  $\xi_{ij}(t_k)$  ( $i = \overline{1, n_i}, j = \text{const}$ ). Целью оценивания являлся выбор наиболее точных методов и оптимальной величины «окна». Точность методов оценивалась для сигналов ПФ оценкой (10), а для сигналов целей (ЕО) оценкой  $\sum \Delta U^2$  вида

$$\sum \Delta U^2 = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} \left[ \hat{M}_{U_{ij}}(t_k) - M_{U_{ij}}(t_k) \right]^2. \quad (11)$$

Математические ожидания  $M_{U_{ij}}(t_k)$  и  $M_{w_{ij}}(t_k)$  (для стационарного и нестационарного по кадру ПФ при малой и высокой яркости ПФ) оценивались отдельно.

При оценивании МО  $M_{U_{ij}}(t_k)$  ГСВ  $U_{w_{ij}}(t_k)$  (местоположение и ширина каждого сигнала и их число) формировались по кадру случайно и анализировались результаты, полученные фильтрами с апертурой размером от 3 до 50 ячеек. При этом наблюдались ошибки вычисления оценок  $\hat{M}_{w_{ij}}(t_k)$ , заметные по краям кадра, вызванные «краевым» эффектом. На практике необходима дополнительная обработка этих участков кадра для устранения «краевого» эффекта. По результатам экспериментов в порядке снижения точности все исследуемые методы распределились в следующем порядке: усеченного среднего, усеченного среднего медианы, двойной медианы, среднего медианы, медианы, среднего. Оптимальная величина «окна» для всех методов составила около 50 ячеек. При этом предварительное отбрасывание резко выделяющихся сигнальных выбросов повысило точность оценивания только для метода среднего.

Полученные результаты показали, что методы среднего и среднего с предварительным отбрасыванием обладают крайне низкой точностью и не могут быть применимы в ОЭС. Наиболее точными являются методы усеченного среднего медианы, усеченного среднего, двойной медианы и среднего медианы, которым несколько уступает метод медианы. При этом точность каждого из методов зависит от реальной фоно-целевой обстановки в поле зрения ОЭС. Это говорит о необходимости применения того или иного метода в зависимости от текущего времени суток и участка небесной сферы, на фоне которого работает ОЭС. Из 50 вариантов обработки оптимальный размер «окна» в размере 50 ячеек (максимальный размер окна при эксперименте) выбран для метода среднего 50 раз, для метода медианы 38 раз, для метода среднего медианы 37 раз, для метода двойной медианы 21 раз, для метода усеченного среднего медианы 19 раз, для метода усеченного среднего 18 раз (оптимальный размер «окна» в 49 ячеек для этого метода выбран 14 раз).

При оценивании МО  $M_{U_{ij}}(t_k)$  предполагалось предварительное устранение из выборки  $\xi_{ij}(t_k)$  МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$  в виде вычисленных оценок  $\hat{M}_{W_{ij}}(t_k)$ , а МО  $M_{U_{ij}}(t_k)$  задавались в заданных пределах (в условных единицах), соответствующих реальным значениям сигналов целей (ЕО). Оценки  $\hat{M}_{U_{ij}}(t_k)$  формировались фильтрами разной апертуры, из которых согласно (11) выбирался фильтр оптимальной апертуры. При моделировании методом Монте-Карло [14] при соблюденных условиях было установлено, что в порядке снижения точности исследуемые методы распределились в следующем порядке: среднего, среднего медианы, двойной медианы, медианы, усеченного среднего медианы, усеченного среднего, а оптимальная величина окна фильтра составляла для разных реализаций от 3 до 10 ячеек (для метода среднего, как правило, пять ячеек). Для тех же условий при обнаружении более «узких» сигналов  $M_{U_{ij}}(t_k)$  с заданными параметрами при моделировании в порядке снижения точности исследуемые методы распределились в следующем порядке: среднего, двойной медианы, медианы, среднего медианы, усеченного среднего медианы, усеченного среднего, а оптимальная величина «окна» фильтра для всех методов была равна или близка к трем ячейкам (для метода среднего три ячейки во всех случаях).

Полученные результаты показали, что самым точным методом для оценивания МО  $M_{U_{ij}}(t_k)$  является метод среднего, менее точным является метод двойной медианы, еще менее точным – метод медианы, а методы среднего медианы, усеченного среднего медианы и усеченного среднего значительно уступают им и примерно равны по точности между собой. Из 50 вариантов обработки в заданных диапазонах изменения амплитуды и ширины сигнала целей (ЕО) оптимальный размер «окна» в размере 3 ячеек выбран для метода усеченного среднего 37 раз, для метода усеченного среднего медианы 36 раз, для методов среднего и среднего медианы 34 раза, для метода двойной медианы 24 раза, для метода медианы 22 раза. Это подтверждает эффективность «медианных» алгоритмов оценивания ЧХ сигналов целей (ЕО) и ПФ. При оценивании ЧХ сигналов ПФ применимы методы усеченного среднего медианы, усеченного среднего, двойной медианы и среднего медианы при «окне» большой величины (при наличии большего числа близкорасположенных ЕО требуется увеличить размер «окна»). При оценивании ЧХ сигналов целей (ЕО) применим метод среднего при «окне» размером от трех до пяти ячеек [при оценивании сигналов более ярких ЕО (целей) и при большем влиянии турбулентной атмосферы требуется увеличить размер «окна»].

Для алгоритмов оценивания ЧХ ПФ методом наименьших квадратов, которые в работе не рассмотрены, схема оценивания (см. рис. 1) также позволяет значительно повысить точность оценивания тренда МО  $M_{W_{ij}}(t_k)$  при применении ОЭС за счет предварительного отброса резких сигнальных выбросов, особенно расположенных на близких угловых направлениях (это характерно, например, для таких участков небесной сферы, как Млечный путь [3]).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, способ обнаружения целей, предложенный в [5], может быть реализован в ОЭС, применяемом при ПАН СХ за счет использования алгоритмов оценивания ЧХ сигналов целей (ЕО) и ПФ. Эти алгоритмы эффективны прежде всего при воздействии на ОЭС яркого ПФ, неравномерного по кадру. Алгоритмы, оценивающие ЧХ, целесообразно объединять в единый комплекс, где выбор конкретного алгоритма зависит от априорной информации (например, от особенностей того или иного участка небесной сферы, на котором должен работать ОЭС в данном сеансе). Это предполагает, в частности, предварительный выбор алгоритмов оценивания ЧХ стационарного или нестационарного по пространству ПФ, выбор степеней полиномов при полиномиальном оценивании тренда МО  $M_{w_{ij}}(t_k)$  и других параметров обработки в зависимости от требуемой точности оценивания и быстродействия. В первую очередь должны работать алгоритмы оценивания ЧХ сигналов ПФ. Оценки ЧХ, формируемые ими, затем используются алгоритмами оценивания ЧХ сигналов целей (ЕО) и одновременно поступают на блок алгоритмов совместного обнаружения-измерения сигналов целей (ЕО), где непосредственно принимается решение об обнаружении сигналов целей (ЕО) с одновременным оцениванием их «центров тяжести», куда позднее поступают и оценки ЧХ сигналов целей (ЕО) [5]. При применении «медианных» алгоритмов оценивания ЧХ сигналов целей (ЕО) можно использовать одновременно поле фильтров разной апертуры, параметры которых предварительно рассчитаны в зависимости от дискретности приёмника, диапазона измеряемых звездных величин, выбранного времени экспозиции, априорных данных об угловых скоростях перемещения целей и иных факторов.

### Список используемых источников

1. Поляков В.В. Адаптивное обнаружение техногенных объектов в околоземном космосе наземными оптическими средствами в условиях априорной неопределенности статистических характеристик обрабатываемых сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника. – 2007. – № 2. – С. 63–69.
2. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М.: Сов. радио, 1978. – 320 с.
3. Поляков В.В. Совместное адаптивное обнаружение-измерение сигналов техногенных объектов в сложных фоноцелевых условиях в наземных пассивных оптико-электронных системах при статистической адаптации // Тр. Междунар. научно-техн. конф. «Четвертые Уткинские чтения» (21 – 22 мая 2009 года, г. Санкт-Петербург, Россия) / Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех»; Ин-т ракетно-космич. тех-ки; Биб-ка ж-ла «Военмех. Вестник БГТУ». – 2009. – №5. – С. 150–156.
4. Поляков В.В. Принципы обработки информации о техногенных объектах в наземных пассивных оптико-электронных системах при статистической адаптации // тр. Междунар. научно-техн. конф. «Четвертые Уткинские чтения» (21 – 22 мая 2009 года, г. Санкт-Петербург, Россия) / Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех»; Ин-т ракетно-космич. тех-ки; биб-ка ж-ла «Военмех. Вестник БГТУ». – 2009. – №5. – С. 160–164.
5. Дашкин Э.Р., Поляков В.В. Алгоритм обнаружения сигналов техногенного космического объекта по последовательности кадров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2013. – № 2. – С. 112–122.
6. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.
7. Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
8. Стратонович Р.Л. Принципы адаптивного приема. – М.: Сов. радио, 1973. – 143 с.

9. *Кравченко В.Ф., Пономарёв В.И.* Новые алгоритмы робастной нелинейной фильтрации изображений с сохранением малоразмерных деталей в присутствии шумов // Радиотехника и электроника. – 2002. – № 47. – С. 76–83.

10. *Юдин Д.Б.* Математические методы управления в условиях неполной информации. – М.: Сов. радио, 1974. – 245 с.

11. *Смоляк С.А., Титаренко Б.П.* Устойчивые методы оценивания (Статистическая обработка неоднородных совокупностей). – М.: Статистика, 1980. – 208 с.

12. *Крылков В.Ф., Шаталов А.А., Ястребков А.Б.* Адаптивный алгоритм обработки сигналов звезд в телевизионной астрономии // Кинематика и физика небесных тел. – К.: АН УССР, 1989. – Т.5, №3.– С. 75–83.

13. *Соболь П.М.* Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1972. – 64 с.

14. *Давид Х.А.* Помехоустойчивые оценки при наличии выбросов. Устойчивые статистические методы оценки данных. – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.

Д.Л. Каргу,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Н.В. Радионов,  
доктор экономических наук, доцент;  
Г.Б. Стеганов,  
кандидат техн. наук, доцент;  
Ю.А. Чудновский,  
кандидат техн. наук;  
Д.А. Шубин

## МОДЕЛЬ ЭНЕРГОПРИТОКА ОТ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ВРАЩЕНИЕМ

В настоящей публикации рассмотрена модель энергопритока от солнечных батарей бортовой системы электроснабжения (СЭС) космического аппарата (КА), стабилизированного вращением. Модель позволяет оценить параметры зависимости выходной мощности солнечной батареи от частоты вращения корпуса КА вокруг своей оси, а также от изменения освещенности солнечных батарей в условиях их частичного затенения (экранирования) элементами конструкции и корпуса КА. Рассмотренная модель позволяет решать задачи выбора оптимальных программ для обеспечения энергодобавки СЭС.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая система электроснабжения, солнечная батарея, фотоэлектрический преобразователь, энергоприток, стабилизация вращением.

Традиционным первичным источником электроэнергии в составе бортовых систем электроснабжения является солнечная батарея (СБ), которая в общем случае является многоэлементной. Солнечная батарея может содержать несколько плоских панелей (или более сложных поверхностей), каждая из которых состоит из множества фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Функционирование каждого отдельно взятого ФЭП определяется его освещенностью и текущей температурой и оказывает влияние на общую мощность и энергию, производимую СБ.

Производительность СБ можно характеризовать через энергоприток электрической энергии. Энергоприток – это количество электрической энергии, выработанной панелями СБ БСЭС в единицу времени (Вт·сек, Вт·ч).

Как на величину выходной мощности СБ (в текущий момент времени), так и на энергоприток влияют следующие факторы:

1. Условия функционирования СБ в космическом пространстве, такие как уровень падающего на панели и отраженного от них излучения, температура панелей, их ориентация относительно Солнца, вращение КА, прохождение теневых зон и экранирование (затенение элементами конструкции КА).

2. Режимы нагрузки, которые определяют значения тока и напряжения в рабочей точке на вольт-амперной характеристике (ВАХ) батареи, а также влияют на установившуюся температуру СБ.

3. Специфические параметры, определяемые материалом и конструкцией ФЭП.

Когда ФЭП облучается солнечным светом, он ведет себя как источник тока в соответствии со своей ВАХ (рис. 1,а) и эквивалентной схемой (рис. 1,б). В случае, когда солнечный элемент находится в тени, его ВАХ (рис. 2,а) и эквивалентная схема (рис. 2,б) аналогичны ВАХ и схеме замещения диода. Из рисунков видно, что значения параллельного ( $R_{\text{пар}}$ ) и последовательного ( $R_{\text{послед}}$ ) сопротивлений в эквивалентных схемах оказывают существенное влияние на величину максимально достижимой выходной мощности.



Показанные на рис. 3 кривые позволяют получить переменные, необходимые для создания точной модели выходного сигнала солнечного элемента. Математическое представление этих характеристик включает четыре основных параметра:  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода;  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания;  $U_p$  – напряжение в точке максимальной мощности (рабочее напряжение);  $I_p$  – сила тока в точке максимальной мощности (рабочий ток). В настоящее время это не единственный, но, вместе с тем, наиболее широко распространенный метод моделирования выходного сигнала ФЭП.

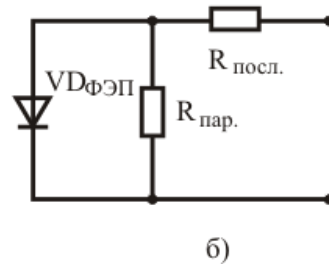
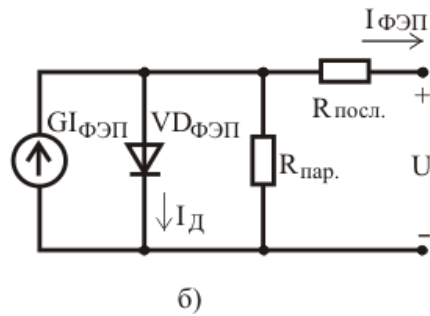
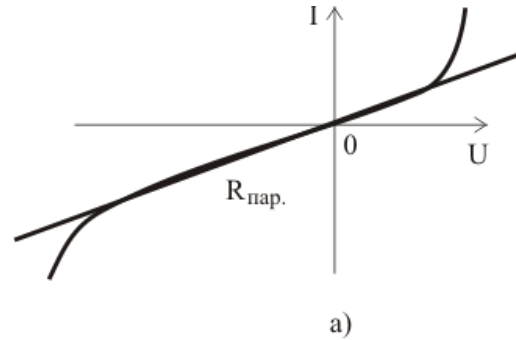


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика (а) и эквивалентная схема (б) для облучаемого ФЭП

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика (а) и эквивалентная схема (б) для затененного ФЭП

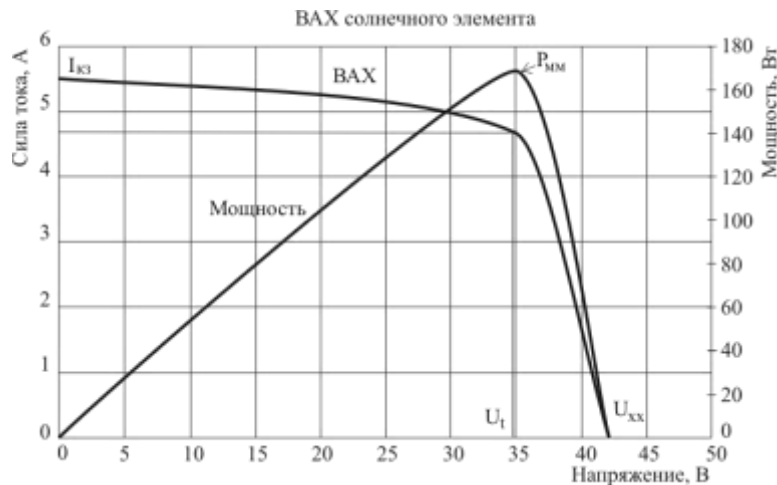


Рис. 3. Вольт-амперная и вольт-ваттная характеристики (ВАХ и ВВХ), используемые для моделирования выходного сигнала ФЭП

Моделирование процесса поступления электроэнергии от СБ в СЭС КА достаточно полно рассмотрено в [1–3]. Однако существующие модели чаще всего учитывают только влияние на энергоприток уровня солнечного излучения и температуры СБ. Предлагаемая модель дополнительно позволяет учитывать вращение КА, а также экранирование СБ при расчете величины энергопритока в бортовой СЭС КА.

Достижение максимальной производительности солнечного элемента может оказаться сложной задачей в силу воздействия ряда причин, уменьшающих величину выходной мощности. Как было отмечено ранее, условия функционирования СБ на любом КА характеризуются пятью факторами: уровнем солнечного облучения, температурой, вращением, затенением КА и экранированием отдельных ФЭП. Влияние уровня солнечного излучения и температуры достаточно широко рассмотрены в [1–4]. Характер изменения ВАХ в этих случаях представлен на рис. 4 и 5. Как видно из рис. 4, при изменении уровня облучения величина выходного тока меняется очень существенно. Напротив, изменение выходного напряжения в зависимости от уровня облучения относительно невелико по сравнению с изменением выходного тока. На рис. 5 приведены ВАХ и ВВХ СБ для значений температуры +25°C и +90°C при постоянном уровне облучения.

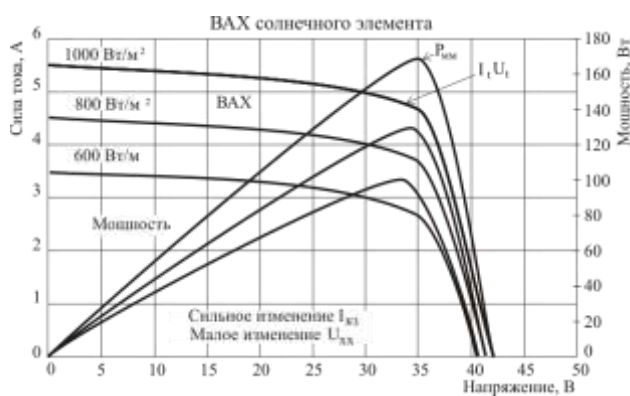


Рис. 4. ВАХ и ВВХ СБ при изменении уровня облучения

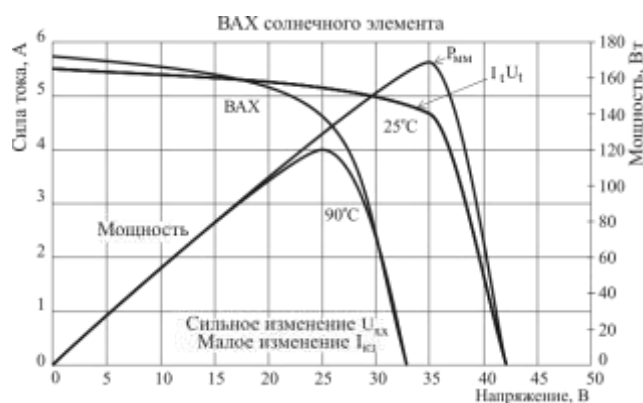


Рис. 5. ВАХ и ВВХ СБ при изменении уровня температуры

Взаимозависимость КПД и электрической мощности СБ определяется равновесной температурой освещенной СБ на освещенном участке орбиты (ОУО)  $T_{ОУО}$ , при которой часть поглощенной световой мощности, не перешедшая в электрическую, рассеивается в виде тепла излучением с обеих сторон панели. Равновесная температура, выраженная в кельвинах, определяется из выражения [3]

$$T_{ОУО} = \sqrt[4]{\frac{C(\alpha_s - \eta)S_p \cos \beta}{(\epsilon_p S_p + \epsilon_T S_T)\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{(P_c - P_э)}{(\epsilon_p S_p + \epsilon_T S_T)\sigma}}, \quad (1)$$

- где  $\alpha_s$  – интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения рабочей поверхностью  $S_p$  СБ;  
 $\epsilon_p, \epsilon_T$  – интегральные коэффициенты излучения рабочей и тыльной поверхностей ( $S_p, S_T$ ) панели СБ;  
 $\eta$  – КПД СБ (зависящий от температуры, КПД СЭ с учетом деградации и от КПД схемы соединения СЭ в СБ);  
 $\beta$  – угол между направлением на Солнце и направлением нормали к плоскости панели СБ;  
 $P_c$  – падающая на него световая мощность;  
 $P_э$  – генерируемая электрическая мощность;  
 $\sigma$  – постоянная Больцмана,  $\sigma = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  
 $C$  – солнечная постоянная,  $C = 1370 - 1385$  Вт/м<sup>2</sup>.

Реальные равновесные температуры СБ на ОУО составляют от +30°C до +60°C, на теневом участке орбиты (ТУО)  $T_{ТУО}$  от -128°C до -140°C. Рабочими могут быть и обе поверхности СБ, как это бывает при их размещении на откидных (раздвижных) панелях – крыльях.

При изменении температуры от  $T_{ОУО1}$  до  $T_{ОУО2}$  вся ВАХ СБ смещается параллельно осям координат  $I, U$  на величины (см. рис. 4 и 5):

$$\Delta I(\Delta T) = \beta_I I_{K30}(T_{OyO2} - T_{OyO1}); \quad (2)$$

$$\Delta U(\Delta T) = \beta_U U_{Xx0}(T_{OyO2} - T_{OyO1}), \quad (3)$$

где  $\beta_I$ ,  $\beta_U$  – температурные коэффициенты изменения тока и напряжения ( $\text{град}^{-1}$ ), причем  $\beta_U < 0$ , а их числовые значения можно оценить по зависимостям, приведенным в [3].

Холодные СБ более эффективны, чем теплые. В результате максимальная мощность батареи наблюдается в период времени ее выхода из зоны затенения до входа в область наибольшей освещенности и установления стационарной (равновесной) температуры. Далее в условиях максимальной освещенности она несколько снижается.

Характеристики орбитального движения КА также вносят существенные поправки в величину энергопритока от СБ. Рассмотрим механизм влияния скорости собственного вращения КА на мощность и энергоприток СБ. Допустим, что КА имеет форму усеченного конуса, на поверхности которого вдоль образующих размещены четыре панели СБ. На рис. 6 и 7 показаны принцип и результат воздействия вращения КА на выходную мощность такой СБ. На рис. 6 каждый выделенный штриховкой элемент на поверхности КА обозначает солнечную панель. По мере вращения КА уровень облучения и температура каждой панели изменяются во времени, причем частота изменений зависит от скорости вращения [1, 4 и 5].

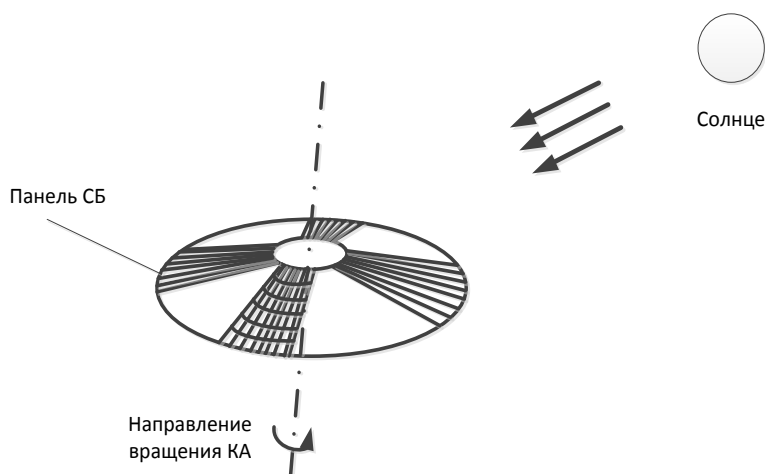


Рис. 6. Орбитальное вращение КА вокруг своей оси

Определение угла ориентации на Солнце элемента панели СБ КА конической формы при вращении КА вокруг главной оси конуса рассмотрено на рис. 7.

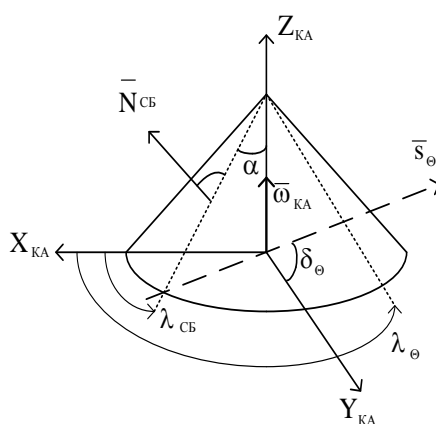


Рис. 7. Определение угла ориентации на Солнце элемента панели СБ КА конической формы при вращении КА вокруг главной оси конуса

С учетом стабилизации вращения КА его ось вращения  $OZ_{КА}$  за малый период наблюдения в инерциальном пространстве будет сохранять свое направление. Но тогда и углы ориентации направления на Солнце относительно плоскости, перпендикулярной к оси  $OZ_{КА}$ , также будут оставаться неизменными (рис. 7):

$$\lambda_{\theta} = \text{const}, \quad \delta_{\theta} = \text{const}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{\theta}$  – угол «долготы» Солнца в системе координат  $OX_{КА}Y_{КА}Z_{КА}$ ;

$\delta_{\theta}$  – угол «склонения» Солнца в системе координат  $OX_{КА}Y_{КА}Z_{КА}$ .

В соответствии с рис. 7 орт нормали к плоскости панели СБ, расположенной вдоль направляющей конуса, плоскость которой отстоит от плоскости  $X_{КА}OZ_{КА}$ , имеет следующие составляющие в системе координат  $OX_{КА}Y_{КА}Z_{КА}$ :

$$\bar{N}_{СБ} = \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \cos \lambda_{СБ}; \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin \lambda_{СБ}; \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right], \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол направляющей конуса корпуса КА;

$\lambda_{СБ}$  – угол отклонения плоскости направляющей конуса от начальной плоскости  $X_{КА}OZ_{КА}$  (в сторону вращения КА).

Единичный вектор (орт), определяющий в системе координат  $OX_{КА}Y_{КА}Z_{КА}$  направление на Солнце, имеет следующие составляющие:

$$\bar{S}_{\Theta} = [\cos \delta_{\Theta} \cdot \cos \lambda_{\Theta}; \cos \delta_{\Theta} \sin \lambda_{\Theta}; \sin \delta_{\Theta}], \quad (6)$$

где  $\lambda_{\Theta}$  – «динамическое» выражение угла отклонения плоскости направляющей конуса от начальной плоскости  $X_{КА}OZ_{КА}$ ,  $\lambda_{\Theta} = \omega_{КА} \cdot t$ .

Учитывая, что векторы  $\bar{N}_{СБ}$  и  $\bar{S}_{\Theta}$  единичные, косинус угла  $\varphi$  между ними можно определить через их скалярное произведение:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \cos \left( \bar{N}_{СБ} \wedge \bar{S}_{\Theta} \right) = \bar{N}_{СБ} \cdot \bar{S}_{\Theta} = \\ &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \cos \lambda_{СБ} \cdot \cos \delta_{\Theta} \cdot \cos \lambda_{\Theta} + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin \lambda_{СБ} \cdot \cos \delta_{\Theta} \sin \lambda_{\Theta} + \\ &\quad + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin \delta_{\Theta}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда мгновенная расчетная мощность СБ в зависимости от времени будет иметь следующий вид:

$$P_{\Theta}(t) = P_{\Theta_0} \cos(\bar{N}_{СБ} \bar{S}_{\Theta}) = P_{\Theta_0} \cos(\varphi(t)), \quad (8)$$

где  $P_{\Theta_0}$  – максимальная расчетная мощность, вырабатываемая СБ при  $\varphi = 0^{\circ}$ .

На рис. 8 показаны циклы нарастания и спада выходной мощности, которые проявляются по мере того, как система из четырех панелей входит и выходит из зоны солнечного света.

Таким образом, фактическое значение мощности согласно (1) и (8) зависит от следующих факторов:

- количества панелей –  $N_{П}$  [шт.] и их размера  $S$  [ $\text{м}^2$ ];
- частоты вращения КА –  $\omega$ ;
- степени нагрева и охлаждения, которым подвергается каждая панель;
- уровня облучения солнечным светом каждой панели.

Кроме того, степень воздействия данных факторов, в свою очередь, зависит от плоскости орбиты КА (например, угла наклона по отношению к Солнцу), расстояния от Солнца и направления движения КА относительно Солнца (приближение или удаление от него).

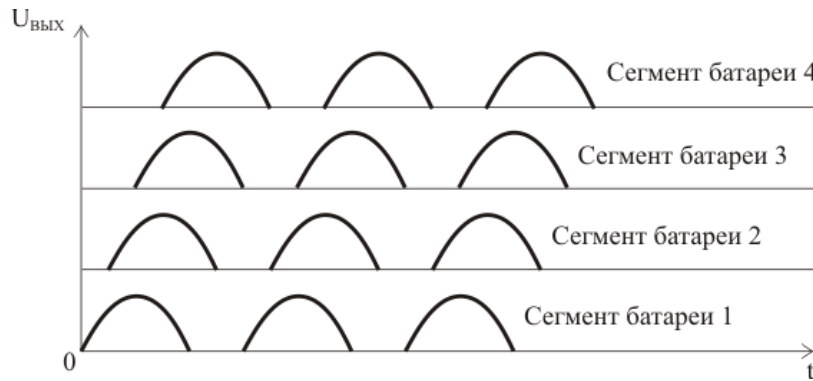


Рис. 8. Циклы нарастания и спада выходной мощности четырех солнечных батарей

Подробное рассмотрение КА, стабилизированных вращением, показывает, что частичное экранирование СБ при вращении КА (рис. 9) влечет также изменение освещенности и температуры панелей СБ. Это изменение является более динамичным, чем при прохождении КА теневых участков орбиты, а также происходит с определенным периодом повторения. Затенение отдельных ФЭП приводит к уменьшению мощности на выходе СБ. Следует обратить особое внимание на то, что степень уменьшения мощности зависит от физической схемы построения (последовательное или параллельное соединение) элементов или сегментов ФЭП в СБ.

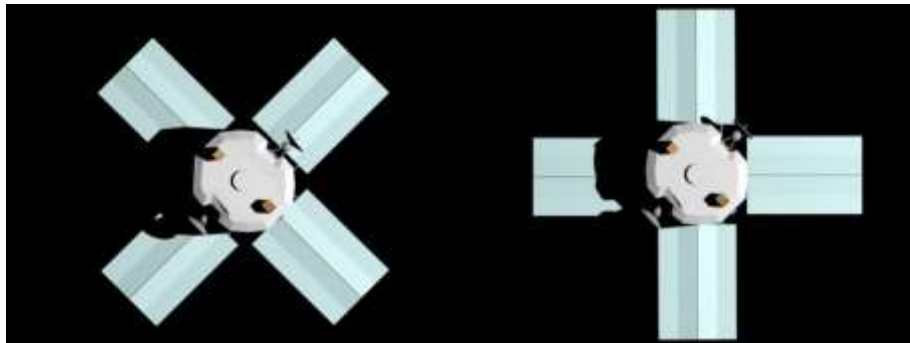


Рис. 9. Освещенность солнечных батарей в условиях их частичного экранирования элементами конструкции и корпуса КА

Эквивалентная схема ФЭП помогает лучше понять электрические свойства и характер функционирования СБ в условиях затенения. Так, например, ток в затененном элементе протекает через параллельное сопротивление (см. рис. 1 и 2). Добавление в схему каждого элемента шунтирующего (обратного) диода позволяет существенно повысить производительность батареи в целом при ее затенении (рис. 10).

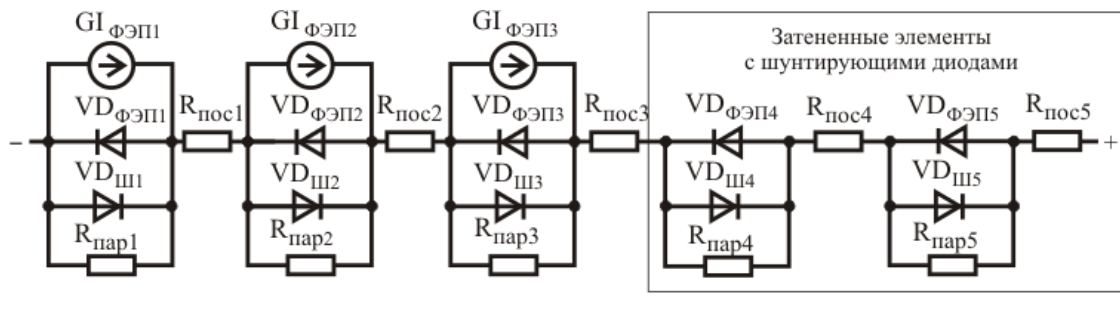


Рис. 10. Добавление в схему каждого элемента шунтирующего диода

Сочетание последовательного и параллельного соединения множества затененных элементов может привести к появлению изменений конфигураций ВАХ, которые представляют дополнительные потери энергии, вырабатываемой СБ (рис. 11) [7]. Данные потери можно охарактеризовать через коэффициент затенения площади  $S$  фотопреобразователей  $k_{ЗАТ}(t)$ .

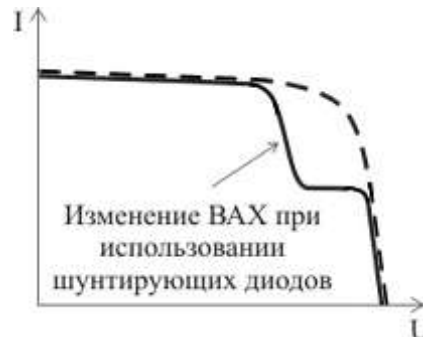


Рис. 11. Изменение ВАХ СБ при затенении части ФЭП

Рассмотрение выше перечисленных факторов позволяет детализировать и конкретизировать выражение мгновенной мощности СБ.

Согласно (1), падающая на СБ световая мощность частично отражается от поверхностей ФЭП, но большая часть поглощается ими и преобразуется в электрическую мощность. Тогда мгновенная мощность СБ, соответствующая располагаемой ВАХ (см. рис. 4, 5 и 11), определяется формулой

$$P_Э^*(t) = \{P_c(t) - (\varepsilon_P S_P + \varepsilon_T S_T) \sigma T_{ОВ0}^4(t)\} \cdot N_{П} \cdot k_D(t) \cdot k_{ЗАТ}(t) \cdot k_{\omega}(\omega, t) \cdot \cos(\varphi(t)), \quad (9)$$

где  $k_D(t)$  – коэффициент деградации вспомогательных элементов СБ;  
 $k_{\omega}(t)$  – коэффициент скорости (частоты) вращения КА;  
 $k_{ЗАТ}(t)$  – коэффициент затенения площади  $S$  фотопреобразователей.

С учетом (9) модель энергопритока от СБ бортовой СЭС КА, стабилизированного вращением  $W$ , позволяющая оценить величину выходной мощности СБ от частоты вращения корпуса КА вокруг своей оси, а также от изменения освещенности СБ в условиях их частичного экранирования элементами конструкции и корпуса КА, можно представить в виде следующего выражения:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P_Э^* dt, \quad (10)$$

где  $t_1$  – время начала освещенного участка орбиты КА;  
 $t_2$  – время окончания освещенного участка орбиты КА.

Рассмотренная модель позволяет провести детальный учет поступившей в систему электроснабжения энергии, необходимый для расчета энергобаланса СЭС КА, стабилизированного вращением. Тогда выражение энергетического баланса можно записать в следующем виде:

$$\int_{t_1}^{t_2} P_Э^* dt = \int_{t_1}^{t_2} (P_H + P_{СЭС} + P_{ПОТ}) dt + \int_{t_2}^{t_3} (P_H + P_{ПОТ}) dt, \quad (11)$$

где  $P_H$  – мощность нагрузок КА;  
 $P_{СЭС}$  – энергопотребление СЭС;  
 $P_{ПОТ}$  – мощность потерь;  
 $t_3$  – время окончания витка КА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная модель энергопритока от СБ КА, стабилизированного вращением, позволяет оценить количество электрической энергии, выработанной панелями СБ в зависимости от частоты вращения корпуса КА вокруг своей оси, а также от изменения освещенности СБ в условиях их частичного экранирования элементами конструкции и корпуса КА. Рассмотренная модель позволяет просчитать и выбрать оптимальные данные для расчета энергобаланса бортовой СЭС КА данного типа, что позволит обеспечить эффективность его целевого применения.

В дальнейшем планируется развить полученную модель для анализа критически важных этапов применения целевой аппаратуры перспективных КА, так как данные этапы характеризуются интенсивными угловыми разворотами при перенацеливании с объекта на объект, сопровождающимися повышенным расходом аккумулярованной электроэнергии и уменьшенным энергопритоком от СБ. Сокращение энергозапаса СЭС снижает производительность специальной аппаратуры КА, которая может быть повышена за счет оптимизации управления энергобалансом и точного прогнозирования затрат электроэнергии на критически важных этапах целевого применения КА.

## Список используемых источников

1. Определение ориентации космического аппарата по измерениям засветки тестовых блоков солнечных батарей / Н.В. Радионов, В.И. Горбулин, Д.Л. Каргу, Н.Н. Астахов, П.А. Комаров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 646. – С. 134–138.
2. *Стеганов Г.Б.* Введение в летную эксплуатацию бортовых систем электроснабжения: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1995.
3. *Ратушняк А.И., Стеганов Г.Б.* Расчет и проектирование бортовых систем электроснабжения и их основных подсистем: руководство по курсовому проектированию. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004.
4. Системы электроснабжения космических аппаратов и ракет-носителей: учеб. пособие / В.А. Власов, Г.Б. Стеганов, Д.Л. Каргу, Н.В. Радионов, В.И. Петренко. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013.
5. Инженерный справочник по космической технике. – МО СССР, 1977.
6. *Артюхин Ю.П., Каргу Л.И., Симаев В.Л.* Системы управления космических аппаратов, стабилизированных вращением. – М.: Наука, 1979.
7. Keysight Technologies. Решение проблем имитации солнечных батарей: руководство по применению. – URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-5915RURU.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).

А.Б. Петухов;  
В.А. Сергеев,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕЗДНЫХ ДАТЧИКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Предлагаемая методика оценивания параметров может быть использована в процессе эксплуатации космического аппарата (КА), когда отсутствуют высокоточное наземное оборудование и возможность проведения большого количества измерений с целью получения достоверных оценок точностных параметров звездных датчиков. Вводится показатель эффективности функционирования приборов звездной ориентации. В результате применения данной методики сокращается число необходимых измерений, время оценивания параметров звездных датчиков КА и повышается достоверность принимаемых решений о соответствии параметров прибора заданным требованиям.

Ключевые слова: космический аппарат, ориентация, точность, эффективность функционирования, оценка вероятности, звездный датчик.

### **ВВЕДЕНИЕ**

К точности функционирования системы управления движением (СУД) космического аппарата предъявляются всё более высокие требования. Исходной информацией для СУД являются результаты измерений текущих параметров ориентации и навигации с помощью инерциальных и оптико-электронных средств (ОЭС). Среди всех бортовых средств измерения параметров ориентации и навигации наилучшую точность имеют звездные датчики. Применение в их составе современных приёмников оптического излучения на основе матричных фотоприемников (МФП) и встроенных в прибор вычислителей позволило существенно повысить точность измерений, повысить частоту обновления информации, увеличить диапазон рабочих угловых скоростей и ускорений, а также расширить функции, реализуемые с помощью приборов звездной ориентации. Все это, а также высокая надежность и помехоустойчивость функционирования приборов звездной ориентации делает возможным их использование непрерывно в контуре управления угловым движением, а не периодически при проведении астрокоррекции инерциальных измерителей. Увеличение функциональных возможностей звездных датчиков требует комплексной наземной отработки и проведения сложных юстировочных и калибровочных работ, проводимых на специальных испытательных стендах с использованием имитаторов одиночных звезд и звездного поля. Наземные испытания создаваемых ОЭС навигации и ориентации по звездам включают в себя большой объем проверок, требуют большого количества рабочих мест и высокоточного технологического оборудования, а также сложных методик подтверждения параметров и характеристик. В общем случае точность определения ориентации характеризуется среднеквадратическими отклонениями (СКО). Главной особенностью методики определения точностных параметров прибора является проверка максимальных суммарных погрешностей определения ориентации приборной системы координат в системе координат испытательного стенда. Систематическую погрешность определения направления на звезду в приборной системе координат представляют в виде СКО определения координат центра изображения звезды на МФП и СКО реализации алгоритмов обработки сигналов, используемых в программном обеспечении прибора. Основными причинами появления систематической погрешности прибора являются: ошибка в определении положения приборной системы координат в системе координат испытательного оборудования; aberrации оптической системы; погрешности изготовления элементов оптической системы, включая МФП, и их уста-



новки в корпусе прибора; неоднородность чувствительности элементов МФП; погрешность установки прибора на борт КА. Результаты наземных испытаний учитываются при проведении калибровки прибора для компенсации систематической погрешности. Калибровка в условиях орбитального полета при длительном функционировании бортовых приборов возможна только с помощью встроенного имитатора звезды. В процессе эксплуатации возникают дополнительные погрешности вследствие деградации параметров элементов оптической системы, в том числе имитатора и МФП, из-за влияния факторов космического пространства (воздействие тяжелых заряженных частиц, радиационного фона, температуры и т.д.). Точность оценивания параметров приборов звездной ориентации снижается. Поэтому необходимо совершенствование методики получения объективной оценки их параметров и характеристик с целью проверки соответствия прибора заданным требованиям.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Повысить точность оценок, полученных по результатам натурных испытаний, можно путем изменения схемы испытаний и выбора показателей качества испытываемого объекта [1]. Для оценивания качества звездного датчика при ограниченном, как правило, числе натурных испытаний предлагается использовать показатель эффективности его функционирования. Наиболее полной объективной мерой эффективности функционирования является вероятность выполнения задачи [2]. Поэтому в качестве показателя эффективности функционирования предлагается вероятность  $p$  получения параметров ориентации с заданной точностью. Статистической моделью процесса получения такой информации является биномиальное распределение, на использовании которого основано большинство оценок эффективности функционирования при условии однородности условия проведения испытаний. Будем полагать, что требования к ОЭС навигации и ориентации по звездам КА заданы в виде значений показателя эффективности функционирования  $\mu_{\text{тр}}$ . Результаты экспериментального исследования (испытаний) представляются в виде реализаций случайной величины  $\hat{x}$ , характеризующей число попаданий в область заданных значений погрешности определения координат звезды  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  в приборной системе координат XYZ. Величина  $\hat{x}$  является дискретной и распределена по биномиальному закону. Биномиальный закон распределения дискретной случайной величины  $\hat{x}$  определяется вероятностями того, что данное событие появится ровно  $x$  раз в последовательности из  $n$ -независимых испытаний, т.е.

$$P(\hat{x} = x) = C_n^x p^x (1-p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, \dots, n,$$

где  $C_n^x$  – число сочетаний из  $n$  по  $x$ .

Пусть известны априорная оценка  $p_p$  вероятности  $p$  и оценка  $p_c$ :

$$p_c = \frac{1}{N_c n} \sum_{i=1}^{N_c} x_i,$$

полученная в результате  $N_c$  экспериментов, каждый из которых включал  $n$  независимых измерений. Необходимо оценить вероятность  $p$  получения параметров ориентации с заданной точностью и принять решение о соответствии прибора заданным требованиям к показателю  $\mu_{\text{тр}}$  эффективности его функционирования.

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Начнем с получения апостериорной оценки показателя эффективности функционирования. Допустим, что существует оценка максимального правдоподобия  $\tilde{p} = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^N x_i$ . Она получена по результатам серии из  $N$   $n$ -кратных испытаний  $x_i$ ,  $i \in \overline{1, N}$ :

$$N = N_c + N_p,$$

где  $N_c$  – число натуральных экспериментов (испытаний);  
 $N_p$  – число гипотетических экспериментов.

Тогда апостериорная оценка показателя эффективности функционирования прибора является функцией величин  $\mu_c$  (опытная оценка),  $\mu_p$  (априорная оценка),  $N_c$ ,  $N_p$ , то есть  $\mu_a = f(\mu_c, \mu_p, N_c, N_p)$ .

Функцию правдоподобия  $L = \prod_{i=1}^N C_n^{x_i} p^{x_i} (1-p)^{n-x_i}$  приведем к виду

$$L(\mu, \tilde{\mu}) = C p^{Nn\tilde{p}} (1-p)^{Nn(1-\tilde{p})},$$

где  $\mu = p$ ;  
 $\tilde{\mu} = \tilde{p}$ ;  
 $C = \prod_{i=1}^N C_N^{x_i}$ .

Апостериорная оценка, учитывающая всю имеющуюся априорную и опытную информацию, с одной стороны, должна быть близка к опытной оценке  $\mu_c$ , а с другой – к априорной оценке  $\mu_p$ . Поэтому рассмотрим статистические гипотезы:

– для  $H_c$

$$p = p_c;$$

– для  $H_p$

$$p = p_p.$$

Отношения правдоподобия для проверки названных гипотез будут определяться выражениями:

$$v_c = \frac{p_c^{Nn\tilde{p}} (1-p_c)^{Nn(1-\tilde{p})}}{\tilde{p}^{Nn\tilde{p}} (1-\tilde{p})^{Nn(1-\tilde{p})}}; \quad v_p = \frac{p_p^{Nn\tilde{p}} (1-p_p)^{Nn(1-\tilde{p})}}{\tilde{p}^{Nn\tilde{p}} (1-\tilde{p})^{Nn(1-\tilde{p})}}.$$

Учитывая, что веса априорной и опытной информации в апостериорной оценке показателя  $\mu$  определяются числами  $N_c$  и  $N_p$ , в качестве апостериорной оценки  $\mu_a$  примем такое значение, которое обеспечивает максимум произведения отношений правдоподобия, то есть

$$\mu_a = \arg \max_{\tilde{\mu}} (v_c^{N_c} v_p^{N_p}).$$

Тогда, используя необходимые условия максимума, получим следующие выражения:

$$N_c \frac{d \ln v_c}{d \tilde{\mu}} + N_p \frac{d \ln v_p}{d \tilde{\mu}} = 0, \quad \frac{d \ln v_c}{d \tilde{\mu}} + \frac{d \ln v_p}{d \tilde{\mu}} = 0$$

при известном и неизвестном числе  $N_p$  соответственно.

Найдем апостериорные оценки вероятности  $p$  соответствия показателя эффективности функционирования прибора звездной ориентации:

– при известном числе  $N_p$

$$p_a = \frac{1}{1 + \left[ (1 - p_c)^{N_c} (1 - p_p)^{N_p} / p_c^{N_c} p_p^{N_p} \right]^{1/(N_c + N_p)}};$$

– при неизвестном числе  $N_p$

$$p_a = \frac{1}{1 + \left[ (1 - p_c)(1 - p_p) / p_c p_p \right]^{1/2}}.$$

Проверка соответствия показателя эффективности функционирования требованиям технического задания основана на биномиальном распределении. Для биномиального закона распределения, являющегося дискретным, нет аппроксимирующих распределений, удовлетворяющих заданному качеству, особенно для малых значений  $N$  [3], поэтому возникает необходимость в разработке новых методов и методик проверки соответствия показателя эффективности функционирования прибора и определения плана испытаний с точки зрения минимума числа натуральных экспериментов  $N_c$ . Проверка соответствия или несоответствия объекта предъявляемым к нему требованиям сводится к проверке статистической гипотезы  $H_0: p = p_{тр}$  (или  $H_0: p \geq p_{тр}$ ), где  $p_{тр}$  – требуемое значение вероятности получения параметров ориентации с заданной точностью. Для проверки этой гипотезы определяется число независимых испытаний  $N_\gamma$  и число положительных исходов  $m_\gamma$  при заданном значении уровня значимости  $\gamma$  (ошибки первого рода) критерия. Поскольку в серии из  $N$  независимых число успешных испытаний  $\hat{m}$  имеет биномиальный закон распределения, то вероятность того, что число  $\hat{m}$  не превышает некоторого заданного значения  $m_3$ , определяется выражением

$$p(\hat{m} < m_3) = \sum_{i=0}^{m_3-1} C_N^i p^i (1-p)^{N-i},$$

где  $C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}$ .

Тогда при условии, что  $p = p_{тр}$ , получим следующее уравнение для определения необходимого числа испытаний  $N_\gamma$  и числа положительных исходов  $m_\gamma$ :

$$\gamma = \sum_{i=0}^{m_\gamma-1} C_{N_\gamma}^i p_{тр}^i (1-p_{тр})^{N_\gamma-i}. \quad (1)$$

Отсюда видно, что если в результате проведения числа испытаний  $N_\gamma$  интересующее нас событие появилось  $m$  раз, то нулевая гипотеза должна быть принята с вероятностью  $(1-\gamma)$  в том случае, когда  $\frac{m}{N_\gamma} \geq \frac{m_\gamma}{N_\gamma}$ . Таким образом, задача будет решена, если будут найдены значения  $N_\gamma$  и  $m_\gamma$ .

В качестве показателя точности решения уравнения (1) возьмем величину

$$\delta = \left| \gamma - \sum_{i=0}^{m_\gamma-1} C_{N_\gamma}^i p_{тр}^i (1-p_{тр})^{N_\gamma-i} \right|. \quad (2)$$

Тогда при заданном или выбранном, исходя из требований к вероятности ошибки первого рода, значении уровня значимости  $\gamma$ , последовательно увеличивая число испытаний, найдем минимальные значения числа испытаний  $N_\gamma$  и числа положительных исходов  $m_\gamma$ , при которых выполняется условие

$$\delta \leq \delta_{доп}, \quad (3)$$

где  $\delta_{доп}$  – допустимая величина ошибки определения уровня значимости, характеризующая точность решения уравнения (1).

Число испытаний определяется по формуле (1) при выполнении условий (2) и (3). От выбора величины  $\delta_{доп}$  также зависят значения  $m_\gamma$  и  $N_\gamma$ :

$$(N_\gamma, m_\gamma) = \arg \min_{N_\gamma \in \Omega} \delta,$$

где  $\Omega = \overline{1, N}$ .

Из рис. 1 видно, что небольшие изменения уровня значимости могут существенно уменьшить число необходимых испытаний.

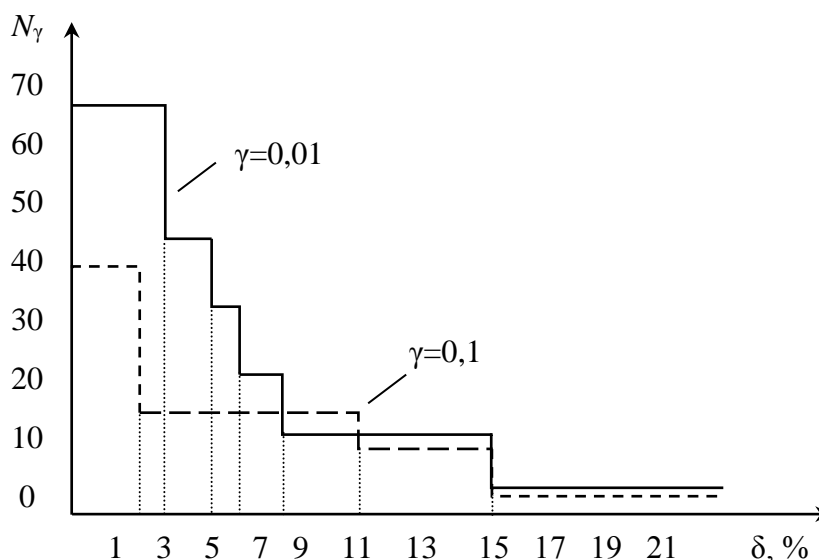


Рис. 1. Зависимость числа необходимых испытаний от точности определения уровня значимости (для заданного значения  $p_{тр} = 0,9$ )

Таким образом, выбором величин  $\gamma$  и  $\delta_{доп}$  при заданном показателе  $p_{тр}$  можно добиться минимального объема испытаний при сохранении практически неизменным достоверности принятого решения о соответствии показателя эффективности функционирования заданному требованию.

При проверке статистических гипотез возможны ошибки как первого рода  $\gamma$ , так и второго рода  $\beta$ . Ошибка второго рода, именуемая также ошибкой заказчика, является не менее важным показателем правильности принимаемого решения. Как правило, ошибка второго рода определяется только исходя из условия повышения мощности  $(1-\beta)$  выбираемого критерия проверки гипотезы. При этом ошибка первого рода должна быть задана, а ее уменьшение будет приводить к росту ошибки второго рода, и наоборот. Одновременное уменьшение  $\gamma$  и  $\beta$  будет приводить к обязательному увеличению числа испытаний. Характер зависимости между величинами  $\gamma$ ,  $\beta$  и  $N$  в ограниченных пределах может меняться в зависимости от правила выбора решения при проверке гипотезы. В ряде случаев ошибка  $\beta$  вообще не определяется, а просто считается минимальной. Критерий, построенный на правиле Неймана – Пирсона, имеет наибольшую мощность среди всех других критериев, имеющих уровень значимости, не превышающий заданного значения  $\gamma$ . Тогда ошибка второго рода определяется как наибольшая вероятность принятия основной гипотезы, когда она неверна, по следующей формуле [5]:

$$\beta = p(\hat{m} \geq m_\gamma; p_\gamma) = \sum_{i=m_\gamma}^{N_\gamma} C_{N_\gamma}^i p^i (1-p)^{N_\gamma-i}, \quad (4)$$

где  $p = 1 - p_\gamma = \frac{N_\gamma - m_\gamma}{N_\gamma}$ . В формуле (4) вероятность получения числа положительных исходов, не меньшего, чем  $m_\gamma$ , находится из условия того, что вероятность положительного исхода каждого испытания равна критической границе  $p_\gamma$ . Поэтому ошибка второго рода зависит только от числа положительных исходов испытаний  $m_\gamma$  и их объема  $N_\gamma$ .

Уравнение (2) можно использовать для определения необходимого числа испытаний  $N_\gamma$  и числа положительных исходов  $m_\gamma$ , задаваясь значениями  $\gamma$ ,  $\delta_{\text{доп}}$  и  $p_m$ . Последовательно увеличивая число  $N_\gamma$ , можно найти минимальное значение  $m_\gamma$ , при котором ошибка первого рода равна  $\gamma$ . Результаты определения плана испытаний приведены в таблице.

Таблица 1

Планы испытаний при заданном значении  $p_{\text{тр}} = 0,9$ 

Уровень значимости, $\gamma$	Число испытаний, $N_\gamma$	Критическая граница, $p_\gamma$	Число положительных исходов, $m_\gamma$	Относительная ошибка, $\delta$
0,01	64	0,813	52	0,80
0,02	35	0,800	28	0,05
0,03	120	0,850	102	0,96
0,04	26	0,808	21	0,35
0,05	87	0,851	74	0,07
0,06	58	0,845	49	0,82
0,07	10	0,800	8	0,27

Необходимо отметить, что назначение конкретного плана испытаний основывается также и на выборе величины ошибки второго рода, значение которой зависит от числа испытаний  $N_\gamma$  и критической границы  $p_\gamma$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика оценивания показателя эффективности функционирования приборов звездной ориентации позволяет использовать всю имеющуюся информацию об оцениваемых параметрах и принимать решение о его соответствии предъявляемым требованиям с заданным значением ошибки первого рода на основании минимального объема необходимых испытаний. Причем существует возможность варьировать планы проведения испытаний при незначительных изменениях уровня значимости, а также определять значения ошибки второго рода. Применение предлагаемой методики значительно сократит время проведения процедуры оценивания и повысит достоверность принимаемых решений о соответствии прибора заданным требованиям.

## Список используемых источников

1. Летные испытания ракет и космических аппаратов / Е.И. Кринецкий, Л.Н. Александровская, А.В. Шаронов, А.С. Голубков. – М.: Машиностроение, 1979. – 464 с.

2. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В.И. Городецкий, А.К. Дмитриев, В.М. Марков, Г.Б. Петухов, Р.М. Юсупов; под ред. Р.М. Юсупова. – Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
3. *Крамер Г.* Математические методы статистики: пер. с англ. / под ред. А.Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
4. *Арсеньев В.Н., Сергеев В.А.* Метод проверки соответствия характеристик объекта требованиям технического задания // Изв. вузов. Приборостроение. – 2002. – №4. – С. 6–10.
5. *Шор Я.Б.* Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. – М.: Сов. радио, 1962. – 552 с.

А.И. Алтухов,  
кандидат техн. наук, доцент;  
В.Н. Калинин,  
доктор техн. наук, профессор;  
В.К. Ковнацкий,  
кандидат техн. наук, доцент

## **ЭКСПЕРТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ФИЗИКЕ**

В публикации предлагается метод измерения уровня профессиональных компетенций обучающихся при выполнении лабораторного практикума по физике, основанный на одной из методик системного анализа – экспертной квантификации результатов решения отдельных задач с использованием соответствующих коэффициентов относительной важности. В качестве примера рассмотрен лабораторный практикум по электродинамике.

Ключевые слова: профессиональная компетенция, педагогическое измерение, лабораторный практикум, системный анализ, экспертный метод, квантификация, коэффициенты относительной важности, учебно-лабораторный комплекс.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Переход российской системы образования к ФГОС ВО означает перестройку образовательной политики и практики работы учебных заведений профессионального образования в соответствии с компетентностным подходом, который предполагает создание условий для овладения обучающимися набором компетенций, определяющих способность (готовность) выпускника к устойчивой профессиональной деятельности [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Важную роль в подготовке военных специалистов инженерного профиля играет дисциплина «Физика», которая изучается на начальном этапе обучения. Она обеспечивает фундаментальность образования и закладывает необходимые основы для успешного освоения последующих общеинженерных и военно-специальных учебных дисциплин. В результате ее освоения у обучающихся должны быть сформированы общенаучные и профессиональные компетенции в соответствии с рабочей программой этой дисциплины.

Одной из таких профессиональных компетенций, которая является общей для всех направлений подготовки и формируется в процессе лабораторного практикума, является *способность планировать и проводить простейшие физические эксперименты, оценивать точность и погрешность измерений, использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных, анализировать физический смысл полученных результатов*. Эта компетенция носит обобщенный характер и включает в свой состав указанные четыре частные компетенции, которые формируются в процессе подготовки, выполнения и подготовки отчетов о выполненных лабораторных работах.

Следует отметить, что научные и методические принципы организации и проведения лабораторных работ в настоящее время всесторонне разработаны и широко применяются в педагогической практике. Результативность практического обучения при этом традиционно оценивается по пятибалльной системе. Соответствующая педагогическая практика имеет многолетний успешный опыт практического применения.

Однако в связи с переходом к компетентностной парадигме образовательного процесса указанный подход оказывается недостаточным, так как он *не позволяет количественно оценить уровень сформированности необходимых конкретных компетенций*. Это обстоятель-

ство требует рассмотрения *новых концепций педагогического измерения*. В настоящей публикации в дискуссионном порядке предлагается метод измерения уровня профессиональных компетенций на основе одной из методик *системного анализа* – экспертной квантификации результатов решения отдельных задач с использованием соответствующих коэффициентов относительной важности (КОВ) [7].

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Предлагаемый метод оценивания уровня сформированности профессиональных компетенций у обучающихся при выполнении лабораторного практикума включает несколько этапов.

1. Формулируется набор требуемых компетенций:

$$K_1, K_2, \dots, K_n, \quad (1)$$

для которых задаются соответствующие *коэффициенты относительной важности* (определяются экспертами):

$$p_1, p_2, \dots, p_n, p_i > 0, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (2)$$

2. Для выполняемого набора  $m$  лабораторных работ

$$S_1, S_2, \dots, S_m \quad (3)$$

задаются *коэффициенты относительной важности каждой из работ  $S_j$*  для формирования соответствующей *компетенции  $K_i$*  (определяются экспертами):

$$q_{ij} > 0, i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (\forall i) \sum_{j=1}^m q_{ij} = 1. \quad (4)$$

3. По итогам выполнения обучающимися указанного набора лабораторных работ и защиты представленных отчетов для каждого из них преподавателем определяется достигнутый *уровень сформированности каждой компетенции  $K_i$*  для каждой выполненной лабораторной работы  $S_j$  в виде положительного числа  $z_{ij}$  в диапазоне от 0 до 10:

$$0 \leq z_{ij} \leq 10, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

4. Далее на основании полученных данных определяется уровень сформированности компетенции  $K_i$  в виде величины

$$y_i = \sum_{j=1}^m q_{ij} z_{ij} \leq 10, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

5. Наконец, полученные данные позволяют получить обобщенную оценку результативности всего рассмотренного лабораторного цикла с точки зрения формирования указанного набора компетенций в виде числового показателя

$$J = \sum_{i=1}^n p_i y_i = \sum_{i=1}^n p_i \sum_{j=1}^m q_{ij} z_{ij} \leq 10, \quad (7)$$



который предлагается рассматривать как итоговую количественную характеристику эффективности практического обучения при выполнении рассмотренного набора лабораторных работ в целом.

Из вышеизложенного следует, что для практического применения описанного метода необходимо располагать предварительно разработанными в соответствии с (2) и (4) матрицами коэффициентов относительной важности:

$$P = \|p_i\|, \quad Q = \|q_{ij}\|, \quad (8)$$

которые для рассматриваемого цикла лабораторных работ задаются экспертами (наиболее квалифицированными методистами кафедры) и утверждаются на заседании кафедры (или предметно-методической комиссии).

Для формирования оценок  $z_{ij}$  наряду с результатами защиты отчетов о выполненных работах целесообразно использовать заранее составленные специальные контрольные тесты по рассматриваемым компетенциям. Они представляют собой определенные задания, для которых разработан эталон решения, т.е. образец полного и правильного выполнения данного задания.

Проиллюстрируем основные элементы описанного метода на примере лабораторного практикума по электродинамике.

### **МАТРИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВАЖНОСТИ ДЛЯ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПО ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ**

В качестве примера рассмотрим использование изложенной выше методики применительно к циклу лабораторных работ по электродинамике. На кафедре физики академии создан соответствующий оригинальный учебно-лабораторный комплекс (УЛК), компоненты которого защищены патентами на изобретения. Комплекс позволяет моделировать источник излучения, среду, однородное или неоднородное электромагнитное поле и измерять его параметры. Учебно-лабораторные установки позволяют также исследовать электромагнитное поле в ближней зоне, моделировать процесс пеленгации источника излучения электромагнитного поля. Особенность комплекса – визуализация исследуемых физических процессов.

Все установки комплекса объединены в восемь групп. Первая группа – установки, экспериментально подтверждающие закон Био – Савара – Лапласа путем замены элементов линейных проводников с током элементами с круговыми проводниками с током. Вторая группа – установки экспериментального обоснования первого и четвертого уравнений Максвелла на основе магнитных колец Гельмгольца. Третья – группа экспериментального обоснования второго и третьего уравнений Максвелла на основе электрических колец Гельмгольца. Четвертая группа – установки для измерения параметров однородного и неоднородного магнитных полей на основе закона Ампера и эффекта Холла. Пятая группа – установки для исследования электромагнитного поля в среде и вакууме с использованием длинного соленоида и плоского конденсатора. Шестая группа – установки для моделирования полей электрического и магнитного диполей. Седьмая группа – установки для моделирования вихревого и потенциального электрических полей на электропроводящей бумаге. Восьмая группа – установки для моделирования процесса пеленгации источника излучения электромагнитного поля.

Как уже указывалось выше, профессиональная компетенция, формируемая в процессе лабораторного практикума, включает в свой состав четыре частные компетенции ( $n = 4$ ):

$K_1$  – способность планировать и проводить простейшие физические эксперименты;

$K_2$  – способность оценивать точность и погрешность измерений;

$K_3$  – способность использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных;

$K_4$  – способность анализировать физический смысл полученных результатов.

Каждый обучающийся по указанию преподавателя выполняет по одной работе из восьми указанных выше групп лабораторных работ ( $m = 8$ ).

Ниже приведен разработанный на кафедре конкретный пример матриц КОВ для указанного учебно-лабораторного комплекса, которые могут быть использованы при практической реализации описанного выше метода оценивания компетенций.

КОВ компетенций (2):

$$p_1 = 0,35; \quad p_2 = 0,20; \quad p_3 = 0,25; \quad p_4 = 0,20.$$

Матрица КОВ (4):

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$
$K_1$	0,20	0,15	0,15	0,20	0,10	0,05	0,05	0,10
$K_2$	0,15	0,15	0,20	0,10	0,05	0,05	0,10	0,20
$K_3$	0,15	0,20	0,10	0,05	0,05	0,10	0,20	0,15
$K_4$	0,10	0,05	0,05	0,10	0,20	0,15	0,15	0,20

Подставляя результаты оценивания уровня частных компетенций  $z_{ij}$  в формулу (7) с учетом коэффициентов приведенных матриц, получим количественную оценку сформированности соответствующей обобщенной профессиональной компетенции у обучающегося в результате подготовки и выполнения заданного набора лабораторных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый экспертный метод позволяет осуществить количественную оценку уровня сформированности профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО. Практическая реализация этого метода целесообразна при разработке компьютерных систем оперативного контроля состояния образовательного процесса в контексте современных информационно-коммуникационных дидактических технологий. Полученные результаты могут быть использованы при оценке успеваемости обучающихся и определении направлений совершенствования содержания и методики лабораторного обучения.

## Список используемых источников

1. Концепция инновационной технологии обучения по дисциплинам профессионального цикла подготовки специалистов в области обработки данных дистанционного зондирования Земли в образовательных учреждениях высшего профессионального образования / Ю.В. Кулешов, А.И. Алтухов, Н.С. Кужекин, М.А. Сквazников, М.А. Чебурков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2012. – Вып. 636. – С. 54–57.

2. Калинин В.Н. Основные направления формирования и критерии оценивания общекультурных и профессиональных компетенций в цикле математических и естественнонаучных дисциплин // Информационный бюллетень № 121. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – С. 19–27.

3. Алтухов А.И., Головина В.В., Калинин В.Н. Формирование и критерии оценивания компетенций в цикле математических и естественнонаучных дисциплин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 642. – С. 210–215.

4. Булекбаев Д.А., Катранов А.Г., Морозов А.В. Формирование компетенций в курсе математики // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 192–201.

5. Кужекин Н.С., Чикуров В.А., Зиновьев С.В. Фонд оценочных средств как компонент основной профессиональной образовательной программы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 202–209.

6. Алтухов А.И., Калинин В.Н., Чебурков М.А. Об опыте формирования и оценивания компетенций по дисциплинам профессионального цикла в системе военного образования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 204–210.

7. Калинин В.Н. Теоретические основы системных исследований: учебник для адъюнктов. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. – 293 с.

В.П. Башкирцев,  
*кандидат педагогич. наук;*  
М.Ю. Касавцев,  
*кандидат техн. наук*

## **МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЛИДЕРСКИХ КАЧЕСТВ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ В УСЛОВИЯХ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

В публикации приведены результаты исследования качественного уровня лидерских качеств будущих военных специалистов. Актуализирована проблема формирования лидерских качеств военнослужащих в ходе повседневной деятельности подразделения. В целях педагогического управления процессом формирования лидерских качеств – важнейшей компетенции командира, авторами разработана методика ее формирования у курсантов в условиях повседневной деятельности военнослужащих.

Ключевые слова: повседневная деятельность, лидерские качества военнослужащих, формирование лидерских качеств военнослужащих.

Требования руководящих документов [10, 13, 5] к новому облику Вооруженных сил Российской Федерации дают четкое понимание того, что армии нужны профессионалы высокого уровня, обладающие развитыми организаторскими, командными, психологическими, педагогическими и лидерскими качествами. Несмотря на это на практике отсутствует общепринятая модель формирования лидерских качеств военнослужащих. А ведь лидерские качества помогут военнослужащему не только самоутвердиться в коллективе во время обучения, но и адаптироваться на первичной офицерской должности после выпуска из вуза. Способность и готовность к лидерству позволит командиру подразделения наиболее успешно строить отношения с подчиненными, в полную силу реализовывать свои командно-организаторские навыки работы с личным составом. Несмотря на то, что задатки лидерских качеств присущи некоторым военнослужащим уже на начальном этапе военной службы, настоящими лидерами не рождаются, а становятся в ходе развития будущего офицера в определенных условиях военно-педагогического процесса.

Лидерские качества – это такая категория личностных качеств, которая формируется у военнослужащих на протяжении военной службы посредством работы с личным составом, при этом основным методом воспитания лидерских качеств военнослужащих, как утверждают В.А. Губин и Д.А. Егоров [6], является личный пример командира подразделения. Именно поэтому к личности командира, еще на этапе отбора кандидатов, должны предъявляться самые строгие требования.

В настоящей публикации под лидерскими качествами понимается совокупность знаний, навыков, умений, способностей из разных жизненных сфер, позволяющих человеку собирать других людей вокруг себя, вести их за собой, создавать свою команду и эффективно управлять ею [3]. Сам перечень лидерских качеств, присущих именно будущим офицерам, рассмотрим ниже.

Анализ литературы и научных публикаций, проведенный авторами, убеждает, что основные теории лидерства не решают проблему подготовки лидера в условиях военно-педагогического процесса. Так, например, в соответствии с «теорией черт» личности Г. Олпорта [12] и его последователей лидером может быть только человек с врожденными лидерскими качествами. Однако, не смотря на наличие множества проведенных ими исследований, единого мнения о перечне качеств, присущих лидеру, не существует.

Объясняется данный факт многообразием ситуаций, возникающих в сфере профессиональной деятельности руководителя.

Бихевиористская «поведенческая» теория основана на убеждении, что лидерами не рождаются, а становятся. Иначе говоря, лидеров можно готовить (обучать) с помощью специальных программ. При поведенческом подходе эффективность любого руководителя определяется не его личностными качествами, а его манерой поведения по отношению к подчиненным или стилем руководства, описанными впервые К. Левиным [17].

Основное отличие «ситуационной» теории лидерства состоит в том, что главное внимание при данном подходе уделяется не лидерским качествам, а действиям человека в ответ на какую-то ситуацию. Ситуационная модель Ф. Фидлера, одного из авторитетных исследователей в данной области, представлена в работе [16].

Опираясь на выводы вышеизложенных теорий, сформировалась «синтетическая» (системная) теория лидерства. Согласно этой теории лидерство есть процесс организации межличностных отношений в группе, а лидер – субъект управления этим процессом. Эффективность руководителя как лидера зависит от трех составляющих: качеств личности лидера; качеств ведомых им людей и характера ситуации, в которой осуществляется лидерство [2]. Большинство отечественных исследований лидерства проводится в рамках именно этой теории.

Современный этап исследований формирования лидерских качеств военнослужащих представлен трудами различных исследователей. Известные в области военной педагогики и психологии ученые А.Г. Караяни и И.В. Сыромятников рассмотрели некоторые психологические аспекты, присущие лидеру в военном социуме, и необходимость учета лидерских качеств военнослужащих при изучении воинского коллектива [7]. А.Г. Маклаков в работе [14] рассмотрел лидерство во взаимосвязи с личностными качествами военнослужащих и привел классификацию военнослужащих-лидеров.

Также отметим, что авторы Н.С. Александрова и В.И. Коцарева рассматривали в статье [1] теоретические аспекты формирования лидерских качеств военнослужащих по призыву. А.В. Вальков на основе анализа исследований лидерских качеств, профессионально значимых для руководителя, проведенных различными авторами, в свою очередь, сформулировал необходимые лидерские качества офицера [4]. Л.П. Ильченко, О.В. Фомичёва, Г.П. Писаренко в результате проведенного исследования [15] определили основные направления формирования лидерских качеств военнослужащих.

Кроме того, ряд авторов провели эмпирические исследования, связанные с формированием лидерских качеств военнослужащих, и опубликовали их результаты. Так, например, А.С. Оленников в своей работе [11] опубликовал результаты исследований, отвечающие на вопрос: «Какие лидерские качества присущи курсантам военного вуза?» и сформулировал свой перечень значимых лидерских качеств будущего офицера. А.С. Колосович исследовал психологические особенности формирования адекватного взаимодействия молодых офицеров с неформальными лидерами в подчиненном подразделении [8]. Установление такого взаимодействия обосновано как направление психологической подготовки, способствующее ускорению адаптации и повышению эффективности управленческой деятельности с самого начала службы.

Всесторонний анализ научных публикаций позволяет получить представление о перечне лидерских качеств, которые должны быть сформированы у военнослужащего, и о некоторых направлениях формирования лидерских качеств военнослужащих. Однако единого подхода к формированию у военнослужащего лидерских качеств, соответствующих современным требованиям, в рассмотренных источниках не встречается. В качестве такого подхода в настоящей публикации предложена разработанная авторами методика формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности.

Проведенные авторами наблюдения за военнослужащими во время выполнения ими мероприятий повседневной деятельности (учебных занятий, несения службы в наряде, управления строями, проведения работы с личным составом и т.д.) указывают на актуальность

поиска решения проблемы формирования лидерских качеств у выпускников на более высоком уровне по сравнению с существующим. Нехватка лидерских качеств приводит к несостоятельности руководителей воинских коллективов, их неспособности противостоять распространению в подразделении негативного влияния неформальных лидеров, укреплению их власти, безнравственности и агрессивности в коллективе военнослужащих и в итоге к невыполнению задач, стоящих перед подразделением.

Потребность в качественном улучшении лидерских качеств военнослужащих делает актуальными проведенные авторами исследования, которые осуществлялись при помощи методов анализа, наблюдения, опроса и тестирования.

Логика эмпирического исследования представлена в виде схемы на рис. 1.

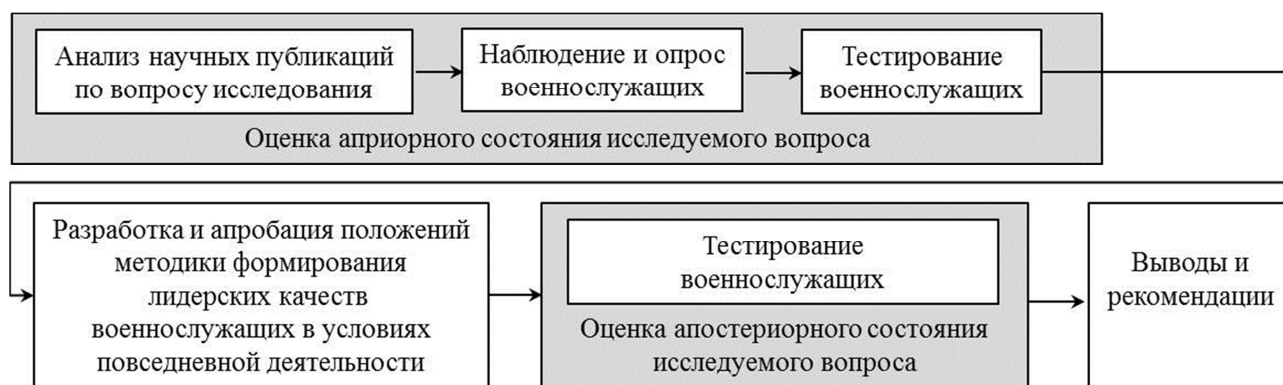


Рис. 1. Схема исследования

Оценка априорного состояния исследуемого вопроса была проведена посредством методов анализа научных публикаций на предмет существующих уже методик формирования лидерских качеств у военнослужащих, а также наблюдения, опроса (табл. 1) и тестирования военнослужащих (табл. 2).

Проведение опроса преследовало следующие цели: во-первых, выяснить общее мнение курсантов об уровне присущих военнослужащим лидерских качеств; во-вторых, получить представление об уровне сформированных лидерских качеств у опрашиваемых военнослужащих. Результаты опроса военнослужащих приведены ниже в табл. 1.

Тестирование проводилось для получения данных о самооценке военнослужащими своих лидерских качеств, таких как: умение управлять собой, осознание цели (знаю, чего хочу), умение решать проблемы, наличие творческого подхода, влияние на окружающих, знание правил организаторской работы, организаторские способности, умение работать с группой. За основу перечня приведенных выше лидерских качеств были взяты результаты теоретических [2, 15] и эмпирических исследований [11]. Тестирование военнослужащих показало следующее:

- 74 % военнослужащих исследуемой выборки планируют связать свою дальнейшую служебную деятельность с работой командира подразделения;
- подавляющее большинство респондентов (99 %) считают, что командир должен обладать развитыми лидерскими качествами;
- все военнослужащие (100 %) выразили желание совершенствовать свои лидерские качества;
- в качестве способов совершенствования лидерских качеств военнослужащих большинство опрашиваемых (87 %) высказались за повышение личной примерности командиров подразделений и введение дополнительных стажировок на должностях младших командиров для каждого военнослужащего, а 80 % респондентов – за введение дополнительного учебного материала по формированию лидерских качеств в повседневной деятельности на факультативных занятиях и дополнительных консультациях по общевойсковой подготовке.

Таблица 1

## Результаты опроса военнослужащих

№ п/п	Качества	Кол-во ответов, %
1	С какой деятельностью Вы планируете связать свою карьеру офицера: а) научно-исследовательской; б) командирской (административной, управляющей); в) инженерно-специальной; г) другое (напишите)	2 71 27 0
2	Как Вы считаете, должен ли каждый выпускник военного вуза обладать развитыми лидерскими качествами: а) да б) нет	100 0
3	Оцените свой уровень развития лидерских качеств: а) высокий; б) средний; в) низкий	8 47 45
4	Считаете ли Вы необходимым заняться развитием своих лидерских качеств в настоящее время: а) да б) нет	100 0
5	Что, по Вашему мнению, необходимо для повышения уровня и качества лидерских качеств выпускников военных вузов: а) наличие вокруг большего количества лидеров – образцов (примеров) для подражания; б) повышение личной примерности командиров курсантских подразделений в вопросах проявления лидерских качеств при управлении подразделением; в) введение факультативных занятий по общевойсковой подготовке и дополнительного учебного материала по формированию лидерских качеств у курсантов; г) введение дополнительных стажировок в роли командира отделения (учебной группы) на младших курсах для каждого курсанта	91 87 79 88

Уровень развития лидерских качеств военнослужащих до и после исследования были определены с помощью теста «Я – лидер» (по А.Н. Лутошкину) [9]. Результаты тестирования, приведенные в табл. 2, выявили следующее:

– до проведения исследования экспериментальная и контрольная группы военнослужащих отвечали на вопросы теста не вполне искренно (59 % против 49 %), а после проведения исследования военнослужащие экспериментальной группы отвечали на вопросы теста более искренно (91 % против 9 %);

– после исследования военнослужащие более адекватно производили самооценку своих лидерских качеств;

– количество военнослужащих экспериментальной группы с сильно развитыми (было 28 %, стало 40 %), развитыми (было 1 %, стало 3 %) и слабо развитыми (было 0,5 %, стало 1 %) лидерскими качествами после применения методики формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности в сумме увеличилось на 15,5 %, число военнослужащих с неразвитыми лидерскими качествами сократилось на 15,5 %;

– количество военнослужащих контрольной группы с сильно развитыми (было 24,5 %, стало 26 %), развитыми (было 0,5 %, стало 2 %) и слабо развитыми (было 4 %, стало 4 %) лидерскими качествами после применения разработанной авторами методики в экспертной группе увеличилось незначительно (3 %), а число военнослужащих с неразвитыми лидерскими качествами сократилось на 3 %.

Таблица 2

**Сравнение результатов тестирования (по А.Н. Лутошкину) «до» и «после» применения методики формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности**

№	Результаты	Экспериментальная группа		Контрольная группа	
		«до»	«после»	«до»	«после»
1	Искренние ответы	59% (13 чел.)	91% (20 чел.)	59% (13 чел.)	64% (14 чел.)
2	Неискренние ответы	41% (9 чел.)	9% (2 чел.)	41% (9 чел.)	36% (8 чел.)
3	Ответ «да» при самооценке своих ЛДК – как развитых	32% (7 чел.)	59% (13 чел.)	14% (3 чел.)	18% (4 чел.)
4	Ответ «нет» при самооценке своих ЛДК – как неразвитых	18% (4 чел.)	4,5% (1 чел.)	18% (4 чел.)	27% (6 чел.)
5	Ответ «да – ложь» при самооценке своих ЛДК. Ответ – ДА/ Результат – НЕТ	27% (6 чел.)	4,5% (1 чел.)	23% (5 чел.)	14% (3 чел.)
6	Ответ «нет – ложь» при самооценке своих ЛДК. Ответ – НЕТ/ Результат – ДА	23% (5 чел.)	27% (6 чел.)	45% (10 чел.)	41% (9 чел.)
7	Сильно развитые ЛДК	28% (49 чел.)	40% (71 чел.)	24,5% (44 чел.)	26% (45 чел.)
8	Развитые ЛДК	1% (2 чел.)	3% (5 чел.)	0,5% (1 чел.)	2% (4 чел.)
9	Слабо развитые ЛДК	0,5% (1 чел.)	1% (2 чел.)	4% (7 чел.)	4% (7 чел.)
10	Неразвитые ЛДК	70,5% (124 чел.)	56% (98 чел.)	71% (124 чел.)	68% (120 чел.)

В результате априорной оценки уровня лидерских качеств военнослужащих очевидными становятся такие факты:

– у военнослужащих существует осознанная потребность и мотивация к формированию и совершенствованию лидерских качеств;

– количество военнослужащих выборки с развитыми в той или иной мере лидерскими качествами, по их мнению, получилось выше (52 респондента), чем на самом деле (44 респондента);

– неискренность и неадекватная самооценка уровня лидерских качеств у части респондентов при ответах на вопросы теста вызвана тем, что респонденты не знают, какие качества военнослужащего относятся к лидерским качествам, а также какие методы, приемы и способы формируют те или иные лидерские качества.

Опираясь на полученные результаты априорной оценки уровня лидерских качеств военнослужащих, авторами были разработаны предложения и рекомендации по совершенствованию лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности, которые были объединены в методику формирования лидерских качеств у военнослужащих в условиях повседневной деятельности.

С целью единого подхода к процессу формирования лидерских качеств у военнослужащих авторы разработали модель процесса формирования лидерских качеств у военнослужащих (рис. 2).

Передаточную функцию модели, изображенной на рис. 2, можно записать в виде

$$Z(s) = \frac{Z_1(s)}{1 + Z_1(s)Z_{OC}(s)}. \quad (1)$$



На объект управления [личность военнослужащего, блок –  $Z_1(s)$ ] оказывает воздействие вектор управляющих параметров  $\bar{U}(s)$ , который запишем в виде следующей суммы:

$$\bar{U}(s) = \bar{P}(s) + \bar{N}(s) + \bar{K}(s), \quad (2)$$

где  $\bar{P}(s)$  – вектор педагогических воздействий на личность военнослужащего;

$\bar{N}(s)$  – вектор некорректируемых воздействий;

$\bar{K}(s)$  – вектор корректируемых воздействий.

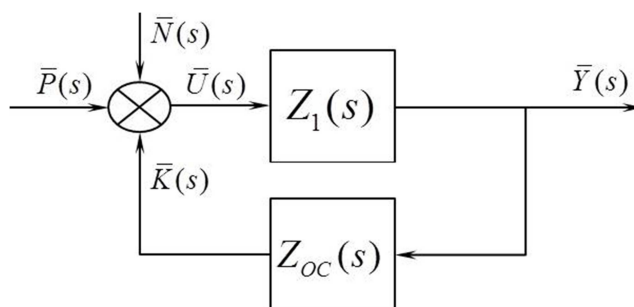


Рис. 2. Модель формирования лидерских качеств у военнослужащего

Под воздействием составляющих вектора  $\bar{U}(s)$  в ходе военно-педагогического процесса у военнослужащего формируются определенные лидерские качества [составляющие вектора управляемых воздействий  $\bar{Y}(s)$ ], состояние которых оценивается при помощи педагогической диагностики. При необходимости смещения акцентов в формируемых у военнослужащих лидерских качествах корректируем состав вектора управляемых параметров  $\bar{U}(s)$  посредством изменения вектора  $\bar{K}(s)$ , который представим в виде выражения

$$\bar{K}(s) = [k_1, k_2, k_3, \dots, k_7], \quad (3)$$

где  $k_1$  – проведение педагогической диагностики с целью выявления начального уровня лидерских качеств военнослужащих;

$k_2$  – проведение факультативных занятий и дополнительных консультаций профессорско-преподавательским составом кафедры организации боевой подготовки и повседневной деятельности с командирами подразделений по вопросам формирования лидерских качеств военнослужащих в повседневной деятельности;

$k_3$  – повышение внимания к военнослужащим при проведении стажировок по программе привития командно-методических навыков и навыков работы с личным составом при проведении мероприятий распорядка дня; самостоятельном проведении занятий и тренажей военнослужащими; несении службы в наряде; управлении строями и т.д.;

$k_4$  – постоянный самоконтроль и личный пример командиров подразделений для подчиненных при выполнении должностных и специальных обязанностей с точки зрения лидерских качеств;

$k_5$  – планирование работы с личным составом с учетом формирования лидерских качеств при реализации методов, приемов и форм воспитания военнослужащих;

$k_6$  – проведение индивидуальной работы с личным составом для оценки уровня лидерских качеств у подчиненных с обязательным выводом по каждому военнослужащему в педагогическом дневнике командира подразделения;

$k_7$  – оказание командирами подразделений и профессорско-преподавательским составом необходимой методической помощи военнослужащим в процессе повседневной деятельности.

В случае, когда корректировка управляющего воздействия не нужна, вектор корректируемых воздействий  $\bar{K}(s) = 0$ . В таком случае воздействие на личность военнослужащего производится только векторами  $\bar{P}(s)$  и  $\bar{N}(s)$ , соответственно вектор  $\bar{U}(s) = \bar{P}(s) + \bar{N}(s)$ . Вектора  $\bar{P}(s)$  и  $\bar{N}(s)$  запишем в виде выражений. Вектор корректируемых воздействий будет иметь вид

$$\bar{P}(s) = [p_1, p_2, \dots, p_6], \quad (4)$$

- где  $p_1$  – воздействие командования вуза;  
 $p_2$  – воздействие профессорско-преподавательского состава;  
 $p_3$  – воздействие командиров подразделения;  
 $p_4$  – воздействие авторитетных младших командиров;  
 $p_5$  – воздействие равных по статусу коллег;  
 $p_6$  – воздействие примеров из жизни значимых для военнослужащего личностей (родственников, знакомых и т.п.).

Вектор некорректируемых воздействий будет иметь вид

$$\bar{N}(s) = [n_1, n_2, \dots, n_8], \quad (5)$$

- где  $n_1$  – положения Общевоинских уставов Вооруженных сил Российской Федерации;  
 $n_2$  – требования Минобороны к военно-профессиональным качествам офицера;  
 $n_3$  – требования приказа Министра обороны №655 от 16.04.2016 года;  
 $n_4$  – характер военнослужащего;  
 $n_5$  – темперамент военнослужащего;  
 $n_6$  – уровень нервно-психологической устойчивости военнослужащего;  
 $n_7$  – наличие (отсутствие) негативного воздействия острой психотравмирующей ситуации на личность военнослужащего;  
 $n_8$  – отсутствие военнослужащего в вузе (отпуск, лечение и т.п.).

В результате на выходе модели получаем вектор управляемых параметров  $\bar{Y}(s)$ , который запишем как выражение

$$\bar{Y}(s) = [y_1, y_2, \dots, y_8], \quad (6)$$

- где  $y_1$  – умение управлять собой;  
 $y_2$  – осознание цели (знаю, чего хочу);  
 $y_3$  – умение решать проблемы;  
 $y_4$  – наличие творческого подхода;  
 $y_5$  – влияние на окружающих;  
 $y_6$  – знание правил организаторской работы;  
 $y_7$  – организаторские способности;  
 $y_8$  – умение работать с группой.

Ниже перечислим положения методики формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности, которая по рекомендации авторов применялась командирами подразделений и профессорско-преподавательским составом вуза.

1. Проведение педагогической диагностики с целью выявления начального уровня лидерских качеств военнослужащих.

2. Проведение факультативных занятий и дополнительных консультаций профессорско-преподавательским составом кафедры организации боевой подготовки и повседневной деятельности с командирами подразделений по вопросам формирования лидерских качеств военнослужащих в повседневной деятельности.

3. Повышение внимания к военнослужащим при проведении стажировок по программе привития командно-методических навыков и навыков работы с личным составом при проведении мероприятий распорядка дня, самостоятельном проведении занятий и тренажей военнослужащими; несении службы в наряде, управлении строями и т.д.

4. Постоянный самоконтроль командиров подразделений за личным примером для подчиненных при выполнении должностных и специальных обязанностей с точки зрения лидерских качеств.

5. Планирование работы с личным составом с учетом формирования лидерских качеств при реализации методов, приемов и форм воспитания военнослужащих.

6. Проведение индивидуальной работы с личным составом для оценки уровня лидерских качеств у подчиненных с обязательным выводом по каждому военнослужащему в педагогическом дневнике командира подразделения.

7. Оказание командирами подразделений и профессорско-преподавательским составом необходимой методической помощи военнослужащим в процессе повседневной деятельности.

8. Систематичная методическая подготовка и обучение младших командиров, начиная со стажеров на должности младших командиров.

9. Проведение педагогической диагностики с целью выявления уровня сформированности лидерских качеств (организация обратной связи).

Апробация положений методики формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности проводилась в одинаковых по численности (22 человека) и равных по априорному уровню развития лидерских качеств военнослужащих экспериментальной и контрольной группах в течение одного семестра обучения. После чего в ходе апостериорной оценки исследуемого вопроса полученные результаты были сопоставлены с результатами априорной оценки (табл. 3).

Таблица 3

### Сравнение лидерских качеств военнослужащих «до» и «после» применения методики

Качества	«До»				«После»			
	Кол-во, %	Место	Кол-во, %	Место	Кол-во, %	Место	Кол-во, %	Место
	ЭГ		КГ		ЭГ		КГ	
1. Умение управлять собой	32	4	8	3	45	4	8	3
2. Осознание цели (знаю, чего хочу)	45	2	12	1	55	2	11	1
3. Умение решать проблемы	25	3	7	4	50	3	7	4
4. Наличие творческого подхода	41	1	9	2	63	1	9	2
5. Влияние на окружающих	9	7	4	7	32	5	3	7
6. Знание правил организаторской работы	12	6	3	8	27	8	3	7
7. Организаторские способности	25	4	7	4	45	4	7	4
8. Умение работать с группой	11	7	6	6	50	3	4	6

Очевиден прирост по всем исследуемым лидерским качествам у военнослужащих и перераспределение приоритетных лидерских качеств.

Таким образом, применение разработанной методики в процессе формирования лидерских качеств позволяет:

- изменять качественный уровень лидерских качеств военнослужащих;
- управлять формированием того или иного лидерского качества, перераспределяя акценты в положениях методики формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности, так как после применения данной методики для военнослужащих экспериментальной группы изменилась иерархия приоритетных лидерских качеств;
- формировать у военнослужащих понимание того, какие лидерские качества необходимы для их профессиональной деятельности;
- вырабатывать у военнослужащих и командиров подразделений представление о том, какими методами, способами и приемами формируются те или иные лидерские качества военнослужащих;
- совершенствовать методическую подготовку командиров подразделений в вопросах воинского воспитания и обучения подчиненных.

### Список используемых источников

1. *Александрова Н.С., Коцарева В.И.* Теоретические аспекты формирования лидерских качеств военнослужащих по призыву // Вестник Вятского государственного университета. – 2009. – Т.3, №4. – С. 31–34.
2. *Баширцев В.П.* Управленческая деятельность военных кадров. Психолого-педагогические аспекты: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 181 с.
3. *Белый К.А.* Лидерские качества. – URL:<http://www.fingeniy.com/liderskie-kachestva/> (дата обращения: 10.11.2017).
4. *Вальков А.В.* Развитие лидерских качеств офицера внутренних войск в образовательном процессе военного вуза // Молодой ученый. – 2012. – №8 (43). – С. 312–315.
5. Военно-профессиональные качества офицера. – URL:<http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12822%40morfDictionary> (дата обращения: 20.10.2017).
6. *Губин В.А., Егоров Д.А.* Психолого-педагогическая модель воспитания военнослужащих-контрактников на личном примере офицера // Ученые записки. – 2014. – № 7 (113). – С. 50–58.
7. *Караяни А.Г., Сыромятников И.В.* Прикладная военная психология – СПб.: Питер, 2006. – 480 с.
8. *Колосович А.С.* Психологические аспекты взаимодействия молодого офицера с неформальными лидерами // Приволжский научный вестник. – 2014. – №3 (31). – С. 134–139.
9. *Лутошкин А.Н.* Тест «Я – лидер». – URL:[http://www.profirk.ru/education/courses/8/?COURSE\\_ID=8&LESSION\\_PATH=44.53](http://www.profirk.ru/education/courses/8/?COURSE_ID=8&LESSION_PATH=44.53) (дата обращения: 10.11.2017).
10. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации. – М.: Воениздат, 2015.
11. *Оленников А.С.* Лидерские качества офицера. – URL:<http://www.scienceforum.ru/2016/1624/21739> (дата обращения: 11.10.2017).
12. *Олпорт Г.* Личность в психологии (теории личности). – СПб., 1998. – С. 64–78.
13. Об организации работы с личным составом в Вооруженных Силах Российской Федерации: Приказ Министра Обороны Российской Федерации №655 от 12.10.2016. – URL:<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=680435#06490173190856161> (дата обращения: 14.12.2017).
14. Психология и педагогика. Военная психология: учебник для вузов / под. ред. А.Г. Маклакова. – СПб.: Питер, 2005. – 464 с.

15. Сердюк И.И., Кривцова М.А. Проблемы формирования лидерских способностей // Концепт. – 2014. – Спецвыпуск № 30.
16. Фомичёва О.В., Ильиченко Л.П., Писаренко Л.П. О лидерстве военнослужащих и направлениях его формирования средствами воинского воспитания // Человек и образование. – 2015. – №1 (42). – С. 38–43.
17. Fiedler F. E. A theory of leadership effectiveness. – N. Y.: McGraw-Hill, 1967. – 310 p.
18. Lewin K., Lippitt R. An experimental approach to the study of autocracy and democracy: A preliminary note // Sociometry. – 1938. – № 1. – P. 292–380.

И.Г. Боровиков;  
И.С. Щербина,  
*кандидат техн. наук, доцент*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА ЛИЧНЫМ СОСТАВОМ БОЕВОГО РАСЧЕТА ЧАСТЕЙ ЗАПУСКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

В публикации рассматривается вопрос моделирования процесса освоения учебного материала персоналом, эксплуатирующим ракетно-космические комплексы. Актуальность темы определяется необходимостью обучения с помощью компьютерных учебно-тренировочных средств и отсутствием моделей, позволяющих оценивать и прогнозировать продолжительность процесса обучения. Авторами предложено описание процесса обучения при помощи теории цепей Маркова. Представлены результаты моделирования фрагмента выполнения учебной программы для обучения боевого расчета частей запуска космических аппаратов с использованием компьютерных учебно-тренировочных средств.

Ключевые слова: компьютерное учебно-тренировочное средство, компьютерное обучение, адаптивное обучение, цепь Маркова, моделирование процесса обучения.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Возникновение нештатных ситуаций (НшС) при выполнении операций технологического графика (ТГ) подготовки ракеты космического назначения (РКН) на техническом и стартовом комплексах является объективной реальностью. Это обусловлено как несовершенством бортовой аппаратуры РКН, технологического оборудования, так и многофакторностью процесса испытаний, характеризующегося воздействием большого количества случайных факторов. Своевременная идентификация причин возникновения НшС, а также эффективные действия по устранению последствий, восстановлению ракетно-космического комплекса (РКК) и возобновлению выполнения операций ТГ во многом обусловлены уровнем обученности эксплуатирующего персонала.

На штатных образцах принципиально невозможно имитировать НшС в целях обучения (они для этого не предназначены). В то же время есть возможность воссоздания любой теоретически возможной НшС без ущерба для РКК и эксплуатирующего персонала, что определяет необходимость использования специализированных компьютерных учебно-тренировочных средств, применение которых оправдывает себя во всех областях подготовки технологического персонала [1].

Такие комплексы в настоящее время используются для обучения эксплуатирующего персонала всех существующих ракет-носителей, космических аппаратов и разгонных блоков, однако ввиду отсутствия математических моделей процесса обучения не позволяют достоверно оценить продолжительность процесса обучения и индивидуализировать обучение на основе данных о ходе выполнения обучающей программы. Следовательно, в настоящее время весьма актуальна задача разработки и совершенствования моделей процесса обучения, позволяющих оценивать продолжительность процесса освоения учебного материала [2].

### **ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА**

Обучение представляет собой управляемый динамический процесс, целью которого является достижение обучающимся целей обучения (или максимальное приближение к ним) исходя из текущего уровня его знаний, умений и навыков. Управление этим процессом

включает в себя планирование и реализацию на каждом шаге обучения соответствующих учебных воздействий и их контроль [3].

Рассматривая обучение с помощью учебно-тренировочных средств как отдельный способ обучения, целесообразно отметить, что его основной особенностью является разделение материала для обучения на независимые друг от друга части (модули, блоки) и составление программы обучения из последовательности этих частей, каждая из которых содержит порцию знаний, действий по их освоению и имеет регламентированную продолжительность. Каждый из этапов завершается контролем уровня обученности. Обучающийся работает самостоятельно и изучает материал в наиболее подходящей для него последовательности, преподаватель (инструктор) осуществляет помощь в ходе обучения и способствует индивидуализации процесса.

Как правило, учебные модули состоят из основного и дополнительного материала, заданий и вопросов для контроля (в виде тестов). При изучении материала обучающийся должен изучить основной материал, пройти тестирование, при необходимости изучить дополнительный материал и пройти итоговое тестирование.

В настоящей публикации предлагается модель процесса обучения, на основе которой можно оценивать и прогнозировать продолжительность процесса обучения. При определенных допущениях процесс обучения можно представить как стохастический граф (сеть СМО, сеть полумарковского процесса, сеть Петри, Марковская цепь). При этом каждым узлом графа задается одна из частей процесса обучения (изучение основного материала, проведение теста, изучение дополнительного материала и т.д.). Дуги между узлами отображают логические связи между блоками с вероятностями перехода от одной части к другой. Вероятности переходов между частями, зависящие от индивидуальных особенностей обучающегося, определяются статистическими методами и апостериорно корректируются.

Учитывая все особенности теоретического обучения с помощью компьютерных учебно-тренировочных средств, описанных выше, целесообразно представить учебный процесс в виде Марковской цепи с дискретным временем. Похожий подход был использован в [4] при моделировании системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем. Для большей наглядности рассмотрим процесс моделирования фрагмента курса обучения.

Для моделирования необходимо иметь информацию о количестве и структуре частей учебного материала, связи между ними, построить матрицу вероятностей перехода из блока в блок и дать оценку средней продолжительности выполнения каждого блока. Количество и структура блоков, их продолжительность в часах и связи между ними определяются программой обучения.

В соответствии с основными положениями теории цепей Маркова процесс обучения может быть рассмотрен как динамическая система, находящаяся в каждый из моментов  $t_k$  в одном из  $n$  состояний [5]:

$$S_i(t_k) \in S(t_k) = \{S_1, \dots, S_n\}, t_k \in T.$$

Переменная  $t_k$  определяет номер шага в процессе обучения и не связана непосредственно со временем. Эта переменная принадлежит некоторому множеству рассматриваемых моментов времени  $T$ .

В соответствии с основным допущением, принятым в теории цепей Маркова, вероятности перехода из одного состояния в другое зависят только от того, в каком состоянии находится система в данный момент, т.е. состояния изменяются в течение времени случайным образом. Процесс такого изменения определяется матрицей переходных вероятностей:

$$P(t_k) = \|p_{ij}(t_k)\| = \begin{bmatrix} p_{11}(t_k) & p_{12}(t_k) & \dots & p_{1n}(t_k) \\ p_{21}(t_k) & p_{22}(t_k) & \dots & p_{2n}(t_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1}(t_k) & p_{n2}(t_k) & \dots & p_{nn}(t_k) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Каждый элемент матрицы  $p_{ij}(t_k)$  отражает вероятность того, что если система в момент  $t_k$  находилась в состоянии  $S_i$ , то в момент  $t_{k+1}$  она окажется в состоянии

$$S_j : p_{ij}(t_k) = P\{S(t_{k+1}) = S_j | S(t_k) = S_i\}.$$

Каждая строчка матрицы  $P$  соответствует состоянию, в котором процесс находится на данном шаге, а каждый столбец – состоянию, в которое переходит процесс на следующем шаге [5].

Переходы во все возможные состояния (в том числе в себя) образуют полную группу событий, поэтому  $\sum_{j=1}^n p_{ij}(t_k) = 1$  для всех  $j=1..n, t_k \in T$ .

В дальнейшем предполагается, что вероятности не зависят от времени, т.е. цепь Маркова однородна.

Пусть вектор-строка  $X(t_k) = [x_1(t_k), \dots, x_N(t_k)]$  описывает распределение вероятностей нахождения системы в соответствующих состояниях в момент  $t_k$ , то есть  $x_i(t_k)$  – это вероятность того, что в момент  $t_k$  система находится в состоянии  $S_i$ . При этом  $\sum_{i=1}^n x_i(t_k) = 1, t_k \in T$ . Тогда по теореме об умножении вероятностей и с учетом основного свойства Марковского процесса получим:

$$x_j(t_{k+1}) = \sum_{i=1}^n p_{ij}(t_k) x_i(t_k), \quad (2)$$

где  $p_{ij}(t_k)$  выступают в роли условных вероятностей перехода в состояние  $S_j$  при условии, что система находится в состоянии  $S_i$ .

В матрично-векторной форме выражение (2) примет следующий вид:

$$X(t_{k+1}) = X(t_k)P. \quad (3)$$

Зададим начальное условие:  $X(t_0) = X_0$ , которое определяет состояние процесса на первом шаге.

Вычисляя последовательно  $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_k)$ , мы можем получить вероятностный прогноз прохождения курса отдельным обучающимся или группой обучающихся со схожим уровнем обученности.

Множество состояний системы  $S$  можно разделить на множество эргодических состояний  $S^1$  и множество поглощающих состояний  $S^2$ . Состояния, относящиеся к множеству  $S^2$ , соответствуют завершению процесса. Поэтому, исключив из матрицы  $P$  строки и столбцы, соответствующие состояниям  $S^2$ , и обозначив оставшуюся матрицу  $Q$ , можно вычислить фундаментальную матрицу цепи Маркова:

$$N = (I - Q)^{-1}, \quad (4)$$

где  $I$  – единичная матрица.



Каждый элемент  $n_{ij}$  матрицы  $N$  представляет собой среднее число пребываний процесса в состоянии  $S_j$  при старте из состояния  $S_i$ . В нашем случае старт всегда происходит из состояния  $S_1$ , поэтому достаточно рассматривать только первую строку матрицы  $N$ .

Зная  $n_{ij}$ , можно вычислить среднюю продолжительность изучения программы обучения по формуле

$$\Theta_{\Sigma} = \sum_{j=1}^s n_{1j} \cdot \Theta_j, \quad (5)$$

где  $\Theta_j$  – продолжительность  $j$ -го шага процесса обучения в часах.

На следующем этапе необходимо произвести оценку дисперсии продолжительности курса. С этой целью вычисляется матрица дисперсий числа пребываний процесса во множестве невозвратных состояний по формуле

$$D = N(2N_{dg} - I) - N_{sq}, \quad (6)$$

где индексы  $dg$  и  $sq$  обозначают соответственно выделение диагональных элементов матрицы  $N$  и возведение в квадрат каждого элемента этой матрицы [6].

Для вычисления среднеквадратичного отклонения числа пребываний процесса во множестве невозвратных состояний от среднего применяется известная формула

$$\sigma_{ij} = \sqrt{d_{ij}},$$

которая в матричной форме имеет следующий вид:

$$\Delta = \|\sigma_{ij}\|. \quad (7)$$

## ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ ФРАГМЕНТА ОБУЧАЮЩЕГО КУРСА

Чтобы проиллюстрировать пример расчета, представим цепь Маркова (рис. 1), моделирующую фрагмент учебной программы по темам специальной подготовки номеров боевых расчетов подготовки РКН к запуску. В модели заданы состояния:  $S_1$  – изучение основного материала по первой теме;  $S_3$  – изучение дополнительного материала по первой теме;  $S_2, S_4$  – тестовые задания по первой теме;  $S_5$  – изучение основного материала по второй теме (в этой теме не предусмотрен контроль);  $S_6$  – изучение основного материала по третьей теме;  $S_8$  – изучение дополнительного материала по третьей теме;  $S_7, S_9$  – тестовые задания по третьей теме;  $S_{10}$  – завершение изучения фрагмента программы обучения. Из рис. 1 видно, что состояния  $S_1 - S_9$  относятся к множеству эргодических состояний  $S^1$ ,  $S_{10}$  – поглощающее состояние, принадлежащее множеству поглощающих состояний  $S^2$ .

На основании перечня занятий подготовки боевых расчетов задана продолжительность выполнения каждого узла. Продолжительность изучения основного материала  $\Theta_1 = \Theta_5 = \Theta_6 = 1$ ч. Продолжительность изучения дополнительного материала  $\Theta_3 = \Theta_8 = 2$ ч. Продолжительность выполнения тестовых заданий  $\Theta_2 = \Theta_4 = \Theta_7 = \Theta_9 = 0,2$ ч.

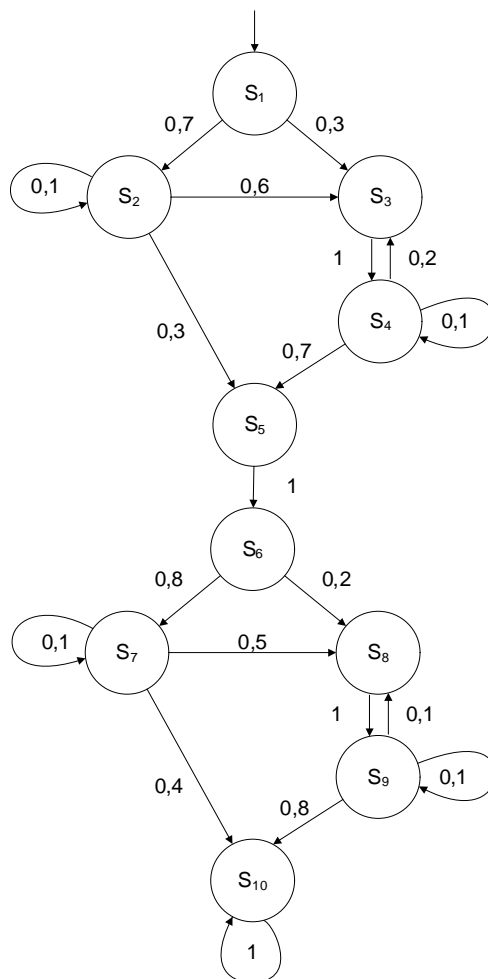


Рис. 1. Модель фрагмента обучающего курса

Зададим вероятности переходов, используя накопленные экспериментальные данные:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0,6 & 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0,1 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0,5 & 0,4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0,1 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Исходя из того, что процесс обучения всегда начинается из состояния  $S_1$ , начальное распределение вероятностей будет следующим:  $X_0 = [1,0,0,0,0,0,0,0,0,0]$ .

Матрица, определяющая среднее число пребывания процесса во множестве эргодических состояний (фундаментальная матрица Маркова), вычисляется по формуле (4) и принимает следующий вид:

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0,78 & 0,99 & 1,1 & 1 & 1 & 0,8 & 0,37 & 0,85 \\ 0 & 1,11 & 0,86 & 0,95 & 1 & 1 & 0,8 & 0,37 & 0,85 \\ 0 & 0 & 1,29 & 1,43 & 1 & 1 & 0,8 & 0,37 & 0,85 \\ 0 & 0 & 0,29 & 1,43 & 1 & 1 & 0,8 & 0,37 & 0,85 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0,8 & 0,37 & 0,85 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,8 & 0,37 & 0,85 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0,18 & 0,75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,25 \end{bmatrix}.$$

Используя формулу (5) можно вычислить среднюю продолжительность процесса:

$$\Theta_{\Sigma} = \sum_{j=1}^s n_{1j} \cdot \Theta_j = 1 \cdot 1 + 0,78 \cdot 0,2 + 0,99 \cdot 2 + 1,1 \cdot 0,2 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 0,8 \cdot 0,2 + 0,37 \cdot 2 + 0,85 \cdot 0,2 = 6,426$$

По формуле (6) вычисляется матрица дисперсий:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0,35 & 0,58 & 0,84 & 0 & 0 & 0,16 & 0,32 & 0,55 \\ 0 & 0,12 & 0,61 & 0,86 & 0 & 0 & 0,16 & 0,32 & 0,55 \\ 0 & 0 & 0,37 & 0,61 & 0 & 0 & 0,16 & 0,32 & 0,55 \\ 0 & 0 & 0,37 & 0,61 & 0 & 0 & 0,16 & 0,32 & 0,55 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,16 & 0,32 & 0,55 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,16 & 0,32 & 0,55 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,19 & 0,56 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,14 & 0,31 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,14 & 0,31 \end{bmatrix}.$$

Среднеквадратичное отклонение продолжительности процесса от среднего значения можно вычислить, используя формулу (7):

$$\sigma_{\Theta} = \sum_{i=1}^9 \sqrt{D_{1,i}} \cdot \Theta_i = 0 \cdot 1 + 0,35 \cdot 0,2 + 0,58 \cdot 2 + 0,84 \cdot 0,2 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 0,16 \cdot 0,2 + 0,32 \cdot 2 + 0,55 \cdot 0,2 = 1,14$$

На рис. 2, 3 приведены графики плотности и распределения вероятностей завершения программы обучения по темам специальной подготовки номеров боевых расчетов подготовки РКН к запуску. Есть возможность определить вероятности завершения процесса обучения за заданное число шагов (переход в состояние  $S_{10}$ ). При этом в качестве шага может выступать любой временной промежуток.

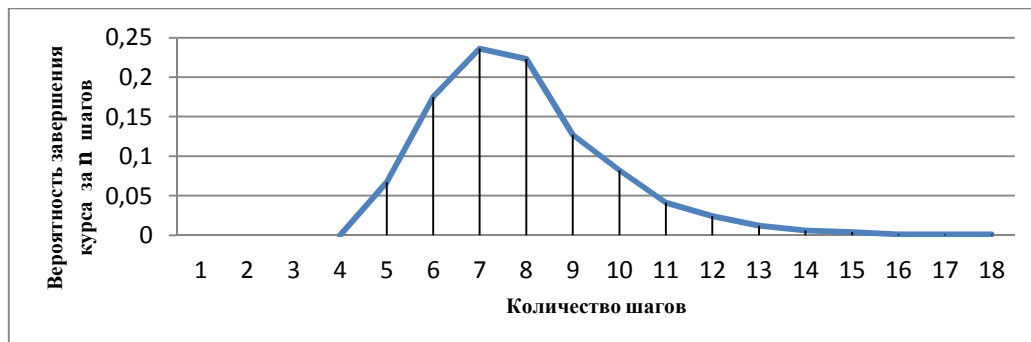


Рис. 2. Плотность распределения вероятностей завершения курса



Рис. 3. Распределение вероятностей завершения курса

Из рис. 1 можно заметить, что минимально необходимое число шагов для завершения процесса обучения равно 5. Вероятность такого исхода равна 0,067, а завершение процесса обучения с вероятностью 0,99 достигается за 14 шагов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время обучение боевого расчета происходит по усредненным программам, составленным эмпирическим путем, что приводит к недостаточному уровню знаний у одних номеров боевого расчета и расходу времени, предоставленного для обучения, на повторение хорошо известного материала у других. Применение предлагаемой модели в совокупности с дидактически правильным построением учебного курса позволит получить следующее:

- распределить вероятности выполнения части программы обучения на каждом шаге процесса обучения, в том числе вероятности завершения обучения за определенное число шагов;
- распределить вероятности вариантов завершения программы, если предусмотрено несколько вариантов завершения;
- среднюю продолжительность выполнения программы обучения;
- дисперсию продолжительности выполнения программы обучения.

Использование полученных данных для корректировки процесса обучения позволит создавать адаптированные для уровня обученности программы учебных курсов, анализировать и корректировать процесс изучения учебного материала в динамике, прогнозировать продолжительность изучения курса при заданном уровне обученности личного состава [7].

## Список используемых источников

1. Белов В.В., Водиченков Д.А., Власов Н.Н. Анализ принципов и российского опыта построения учебно-тренировочных средств // Прикладные исследования. – 2016. – №1.
2. Карпенко А.П. Модельное обеспечение автоматизированных обучающих систем. Обзор // Наука и образование. – 2011. – №7.
3. Стручков А.М. Противоречия развития компьютерных учебно-тренировочных средств, предназначенных для обеспечения теоретического обучения // Программные продукты и системы. – 2013. – №2.

4. Дьяков А.Н., Решетников Д.В., Бояришинов С.Н. Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем // Вооружение и экономика. – 2016. – № 3 (36). – С. 35-43.
5. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
6. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
7. Беспалько В.П. Образование и обучение с участием компьютеров (педагогика третьего тысячелетия). – М.: Издательство Московского психолого-социального института, 2002. – 352 с.

Д.А. Булекбаев,  
*доктор техн. наук, доцент;*  
А.В. Морозов,  
*кандидат физико-математических наук, профессор*

## **ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ НАВЫКОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА У ОБУЧАЮЩИХСЯ НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Компьютер дает возможность не только проводить расчеты с большой степенью точности, но и комплексно исследовать сложные нелинейные математические модели при помощи ряда целенаправленных вычислительных экспериментов. Совместное использование качественных методов теории дифференциальных уравнений и современных пакетов прикладных программ позволяет с максимальной эффективностью проводить исследования сложных моделей реальных объектов. Ниже на основе такого качественно-численного анализа приводится результат исследования уравнения Дюффинга – Ван-дер-Поля – обобщенной модели автогенератора.

Ключевые слова: динамическая система на плоскости, фазовое пространство, положение равновесия, предельный цикл, гомоклиническая траектория, моделирование динамических систем на ПК.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Теория обыкновенных дифференциальных уравнений является обязательным и важнейшим разделом курса высшей математики, излагаемым для инженерных специальностей. Дифференциальные уравнения применяются в самых различных областях современной науки и техники. Кроме приложений в механике, физике, теории колебаний, теории управления, астрономии, а также в многочисленных технических дисциплинах, они всё более заметную роль стали играть в химии, экологии, метеорологии, экономике и медицине. Вместе с тем в последние годы распространилась определенная тенденция – учить в теории дифференциальных уравнений определенным рецептам, а не исследованию [1]. Конечно, важно, чтобы обучающиеся приобрели конкретные навыки в интегрировании определенных типов дифференциальных уравнений. Однако практика, как правило, предоставляет уравнения, не подпадающие под известные интегрируемые типы. Исключением, пожалуй, являются линейные системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Напрашивается вывод, что необходимо к традиционно излагаемому материалу добавить, хотя бы в весьма ограниченном виде, ряд вопросов качественного анализа дифференциальных уравнений, асимптотического анализа и элементов численного моделирования. Это будет способствовать формированию у обучающихся соответствующих навыков, позволяющих им в дальнейшем осваивать дисциплины профессионального цикла.

### **КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕПРЕРЫВНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Теория динамических систем в настоящее время является самостоятельной наукой с широким спектром приложений. Истоки она берет в теории дифференциальных уравнений, теоретической механике и теории колебаний. Пожалуй, в настоящее время она является и самой бурно развивающейся математической наукой. Задачей качественного исследования является изучение свойств решений без непосредственно процедуры интегрирования. Такой подход возник после осознания того, что мы далеко не все уравнения можем проинтегрировать и предъявить их решения. Особую роль здесь играет понятие фазового пространства – пространства состояний динамической системы. Динамические системы делятся на системы

с непрерывным временем и дискретным. Динамические системы с непрерывным временем описываются дифференциальными уравнениями, динамические системы с дискретным временем – итерациями отображений.

Хорошо известно, что анализ нелинейных динамических систем является сложной проблемой по сравнению с исследованием линейных систем. Кроме того, теория линейных автономных систем в настоящее время полностью построена. По существу каждая нелинейная динамическая система по-своему уникальна и требует привлечения тонких методов, к которым, например, можно причислить методы качественного анализа. Конечно, к настоящему времени накоплен большой опыт методов исследования таких систем и выделены классы нелинейных объектов, теория которых практически закрыта. В значительной степени это относится к динамическим системам на плоскости, т.е. с фазовым пространством размерности 2. Однако и в этом классе систем существуют нерешенные задачи (например, 16-я проблема Гильберта). Исследование таких моделей осложняется тем, что они включают в себя параметры. Причем в одних областях пространства параметров система ведет себя достаточно просто, в других – сложнее, в третьих – сложно и непонятно. В связи с этим возрастает роль бифуркационного анализа и моделирования траекторий системы на компьютере, т.е. роль вычислительного эксперимента. Бифуркационный анализ [2–5] заключается в определении областей в пространстве параметров, которым отвечает определенный характер поведения траекторий. Такой анализ порой вызывает значительные и непреодолимые трудности или его не всегда удается провести с достаточной полнотой. Теория бифуркаций, которая является составной частью теории динамических систем, – в настоящее время сложившаяся и активно развивающаяся математическая наука, имеющая множество результатов и приложений. Именно приложения и дали основания для ее становления. Краткому обзору результатов этой науки посвящена популярная статья [3], доступная для изучения курсантам первого и второго курсов. Здесь же мы ограничимся незначительными элементарными фактами этой теории, восполняя незнание теории результатами вычислительного эксперимента.

Немалое значение при исследовании любой системы играет временной фактор. Получение теоретического результата в исследовании новой системы требует, как правило, большого ресурса времени. Вычислительный же эксперимент, проведенный в конкретной программной среде с опорой на элементы качественного анализа, дает конкретную информацию за сравнительно малое время, чего нельзя сказать о времени получения информации чисто качественного характера. В настоящее время разработаны мощные пакеты прикладных программ, позволяющие анализировать динамику системы быстро, эффективно и разносторонне. Современные средства визуализации позволяют если не в полной мере выяснить суть происходящего, то, по крайней мере, выявить многие важные свойства в поведении систем. К таким свойствам в первую очередь следует отнести диссипативность системы, устойчивость стационарных решений, наличие периодических режимов функционирования, колебательность переходных процессов, расположение сепаратрис и их поведение при вариации параметров системы, хаотичность поведения.

Исследование каждой нелинейной динамической системы начинается с выполнения ряда обязательных этапов. Для системы с фазовым пространством  $R^2$ :

$$\begin{cases} \dot{x} = P(x, y, \mu, k), \\ \dot{y} = Q(x, y, \mu, k) \end{cases} \quad (1)$$

(здесь  $\mu, k$  – параметры) они следующие.

1. Находят положения равновесия системы (1) из системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} P(x, y, \mu, k) = 0, \\ Q(x, y, \mu, k) = 0. \end{cases}$$

Устанавливается их зависимость от параметров  $\mu, k$ . На этом этапе анализируется простейшая из бифуркаций – бифуркация «рождения» («гибели») положений равновесия.

2. Проводят линеаризацию системы в окрестности каждого из положений равновесия и определяют их тип (узел, седло, центр, фокус). При этом устанавливаются области параметров, в которых положения равновесия имеют определенный тип.

3. Строят изоклины вертикальных и горизонтальных наклонов.

4. Определяют области, в которых:

$$\dot{x} > 0, \quad \dot{y} > 0;$$

$$\dot{x} > 0, \quad \dot{y} < 0;$$

$$\dot{x} < 0, \quad \dot{y} < 0;$$

$$\dot{x} < 0, \quad \dot{y} > 0.$$

Это позволяет указать направления движения изображающих точек по траекториям.

5. Выясняют существование симметрий в фазовом портрете (относительно осей, относительно точек).

6. В некоторых случаях оказывается полезным рассмотреть изоклины уравнения

$$\frac{dy}{dx} = \frac{P(x, y, \mu, k)}{Q(x, y, \mu, k)}.$$

7. Определенную информацию можно получить в результате анализа поворота векторного поля по отношению к вариациям какого-либо из параметров.

8. Особую роль в таком исследовании играет расположение особых траекторий, к которым относятся сепаратрисы седловых положений равновесия (две входящие в седло и две выходящие из него). Угловые коэффициенты сепаратрис в седле устанавливаются в результате линеаризации векторного поля в нем.

*Замечание.* Исследование системы (1) может потребовать более основательного привлечения теории бифуркаций. При этом увеличивается ресурс времени, отведенный на решение задачи и связанный с изучением теории вопроса. Не исключена ситуация, что ответа на возникший вопрос в учебниках и монографиях, а также научных статьях нет. Таким образом, возникают новые математические задачи. Чтобы достичь результата более экономичным путем, незнание полной теории вопроса можно и даже необходимо компенсировать рядом целенаправленных вычислительных экспериментов. Так в науке было всегда и вероятно останется еще долго. Как говорят, компьютер становится соавтором получения нового результата.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ НА ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ В WINSET

Если все приемы качественного анализа исчерпаны или их дальнейшее применение вызывает теоретические трудности, то переходят к численному моделированию траекторий. Компьютерная программа WinSet [6] является узкоспециальной и предназначена для построения изображений трех категорий объектов: отображений, фракталов и дифференциальных уравнений. Программа имеет привычный удобный интерфейс, в силу чего ее можно рекомендовать в качестве инструмента исследования преподавателям при проведении лабораторных работ по различным естественнонаучным и техническим дисциплинам, использующим дифференциальные уравнения, а также научным сотрудникам, исследующим динамические системы в своей научной работе. Пользователь, не владеющий специальными навыками в области компьютерной математики и информатики и не достаточно хорошо разбирающийся в сложных математических пакетах типа Matlab, может достаточно быстро разобраться в ра-



боте программы WinSet. Для запуска установленной программы WinSet нужно в меню «Пуск» выбрать «Все программы» выбрать папку «WinSet» и запустить файл «WinSet.exe». После этого появится главное окно программы, имеющее привычный для пользователя вид. На рис. 1 приведен ряд стандартных окон программы, демонстрирующих простоту этого программного продукта и дальнейший очевидный ход действий пользователя. Кроме того, в пакете прилагается и справочный материал по базовым элементам программы.

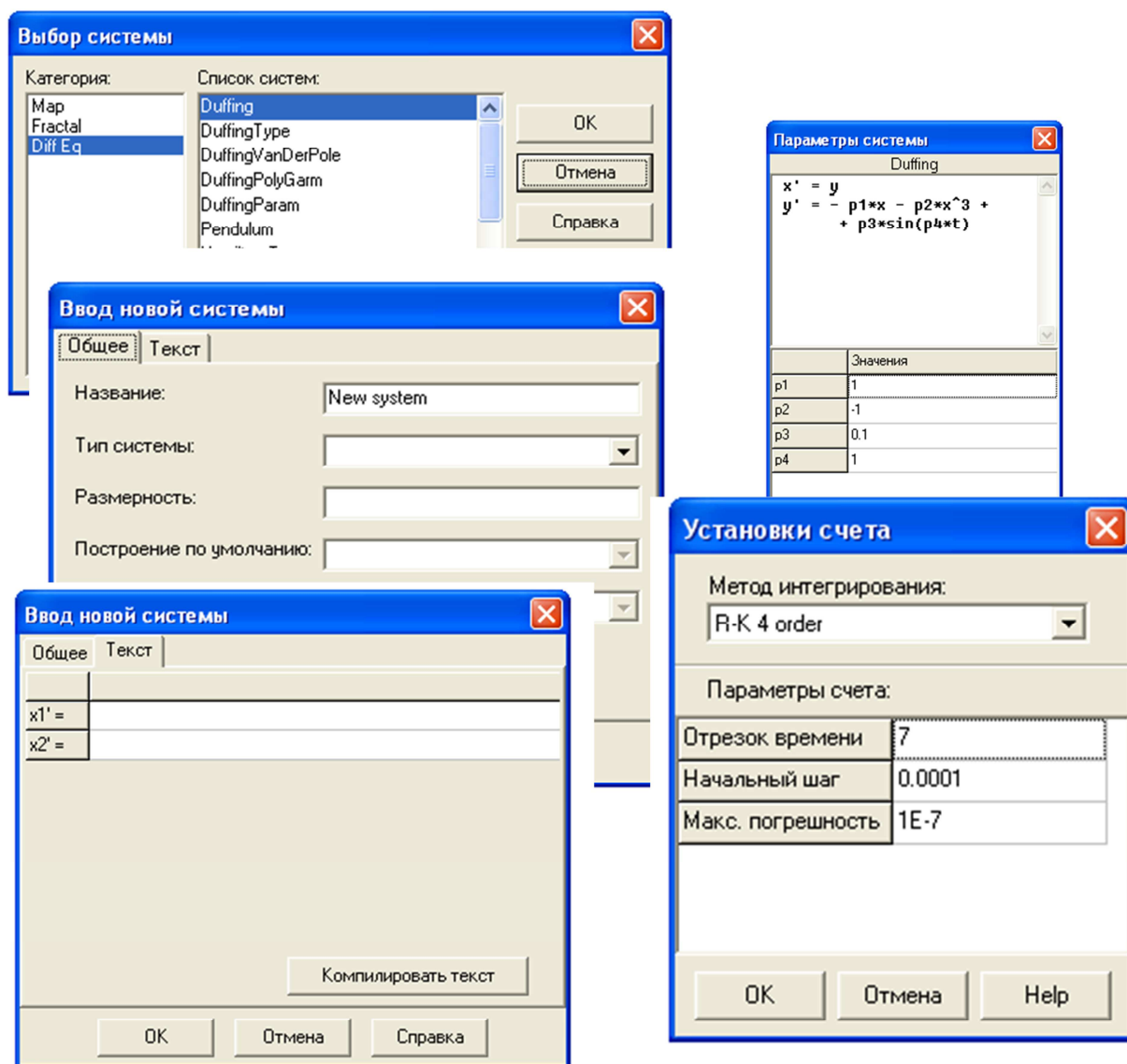


Рис. 1. Окна программы WinSet

Программа предусматривает естественный ввод системы дифференциальных уравнений и ее параметров, выбор метода численного интегрирования, шага интегрирования, промежутка интегрирования, масштабирование фазового пространства, вывод участка траектории на экран монитора, построение особых траекторий и многое другое. За незначительное время, таким образом, можно представить семейство траекторий, т.е. эскиз фазового портрета для заданного фиксированного набора параметров. Задавая другим набором параметров, можно проанализировать изменения в фазовом портрете и прочувствовать влияние вариации какого-либо параметра на структуру портрета. В этом заключается суть численного моделирования траекторий на фазовой плоскости.

## ПРИМЕР КАЧЕСТВЕННО-ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим теперь конкретный пример уравнения Дюффинга – Ван-дер-Поля [2]:

$$\ddot{x} + \mu(kx^2 - 1)\dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\mu, k, \alpha, \beta$  – параметры ( $\mu > 0, k > 0$ ). При  $\mu = 0$  уравнение (2) соответствует уравнению Дюффинга, при  $\beta = 0$  – уравнению Ван-дер-Поля. Теория этих уравнений к настоящему времени достаточно полно изучена [2]. Заметим, что при  $\mu = 0$  уравнение (2) в зависимости от знака произведения  $\alpha \cdot \beta$  моделирует движение частицы на криволинейном стержне (рис. 2).

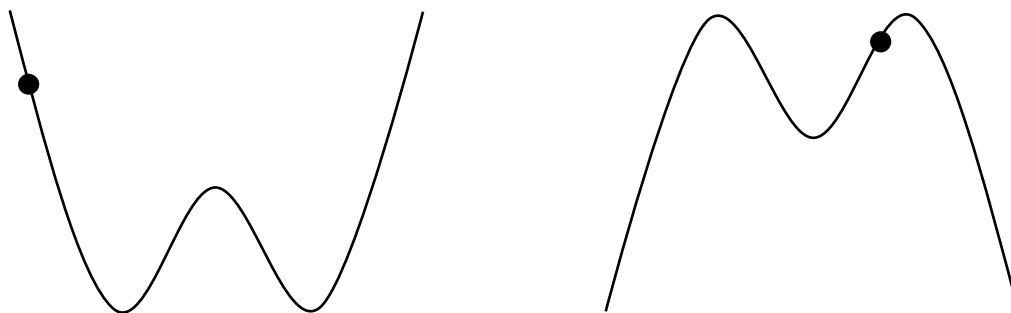


Рис. 2. Случай  $\alpha < 0, \beta > 0$  (слева), случай  $\alpha > 0, \beta < 0$  (справа)

Несложно показать, что уравнение (2) в предположении  $\alpha\beta \neq 0$  может быть сведено к одному из двух:

$$\ddot{x} + \mu(kx^2 - 1)\dot{x} - x + x^3 = 0; \quad (3)$$

$$\ddot{x} + \mu(kx^2 - 1)\dot{x} + x - x^3 = 0. \quad (4)$$

Таким образом, фактически пространство параметров оказывается двумерным  $\mu, k$ .

Ясно, что  $C_1(-1,0)$ ,  $C_0(0,0)$  и  $C_2(1,0)$  – их положения равновесия.

Полный теоретический анализ структуры фазовых портретов уравнений (3) и (4), т.е. их зависимость от параметров  $\mu$  и  $k$ , сложен и требует привлечения математического аппарата, далеко выходящего за рамки стандартного курса дифференциальных уравнений [4]. Ниже приводится результат, который получен на основе простейшего качественного анализа уравнения (3), проведенного по вышеуказанной схеме и моделирования его траекторий на фазовой плоскости  $(x, \dot{x})$ . Получение такого результата вполне по силам курсанту первого-второго курсов. Такое исследование может быть проведено в рамках курсовой работы по численным методам или дифференциальным уравнениям. При этом курсант: 1) формирует навыки проведения вычислительного эксперимента; 2) визуализирует основные понятия и элементы качественной теории дифференциальных уравнений; 3) расширяет кругозор в смежных дисциплинах; 4) синтезирует полученные знания. Проведение таких исследований содействует более глубокому изучению и усвоению математических и естественнонаучных дисциплин учебного плана и обучению курсантов самостоятельному решению прикладных научно-технических задач на основе комплексного подхода к изучению математических дисциплин.

*Утверждение.* Для  $0 < \mu < 1$  существуют положительные числа  $1 < k_1 < k_2$  такие, что на фазовой плоскости уравнения (3) наблюдаются следующие структуры:

1. При  $0 < k < 1$  один устойчивый цикл  $\Gamma$  (рис. 3), при этом  $C_1(-1,0)$  и  $C_2(1,0)$  – неустойчивые узлы (либо фокусы),  $C_0(0,0)$  – седловое положение равновесия.

2. При  $1 < k < k_1$  рождаются два неустойчивых цикла  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  (рис. 4), при этом положения равновесия  $C_1, C_2$  становятся устойчивыми.

3. При  $k = k_1$  два неустойчивых цикла  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  объединяются, образуя гомоклиническую восьмерку (рис. 5).

4. При  $k_1 < k < k_2$  гомоклиническая восьмерка переходит в неустойчивый цикл  $\Gamma_0$  (рис. 6). Цикл  $\Gamma_0$  охватывает все положения равновесия.

5. При  $k = k_2$  устойчивый цикл  $\Gamma$  слипается с неустойчивым циклом  $\Gamma_0$  (рис. 7), образуя полуустойчивый цикл;  $C_1, C_2$  – устойчивые положения равновесия.

6. При  $k > k_2$  полуустойчивый цикл исчезает, и система становится глобально асимптотически устойчивой, т.е. каждая траектория системы стремится к некоторому положению равновесия (рис. 8).

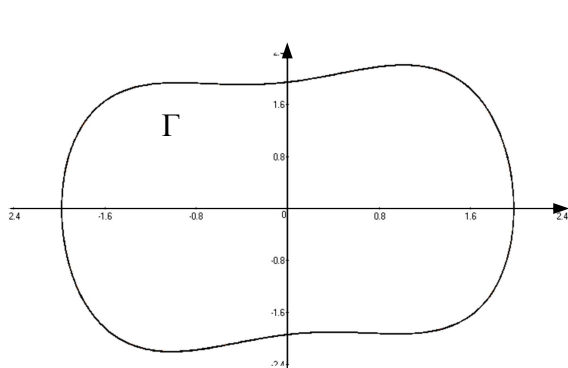


Рис. 3. Значение параметра  $k = 0,95$

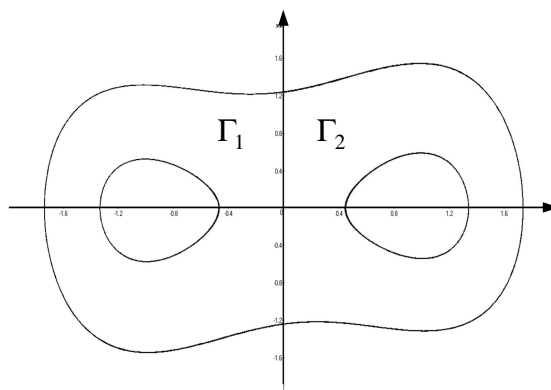


Рис. 4. Значение параметра  $k = 1,1$

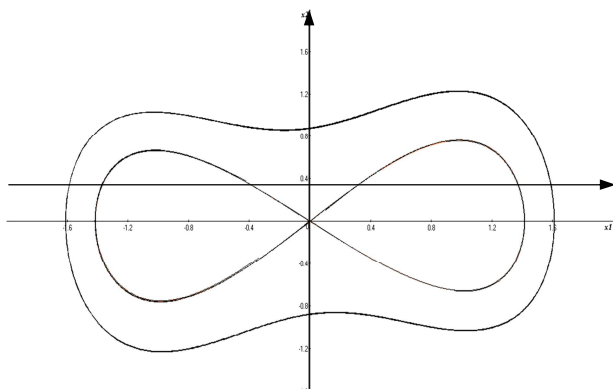


Рис. 5. Значение параметра  $k = 1,25$

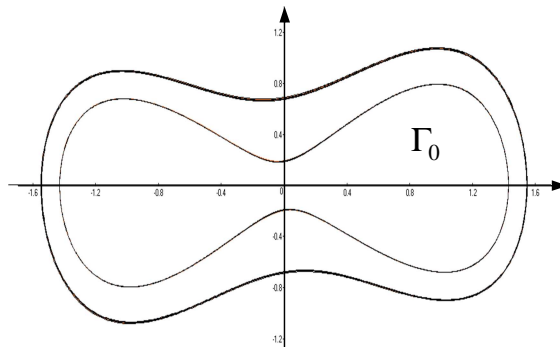


Рис. 6. Значение параметра  $k = 1,3$

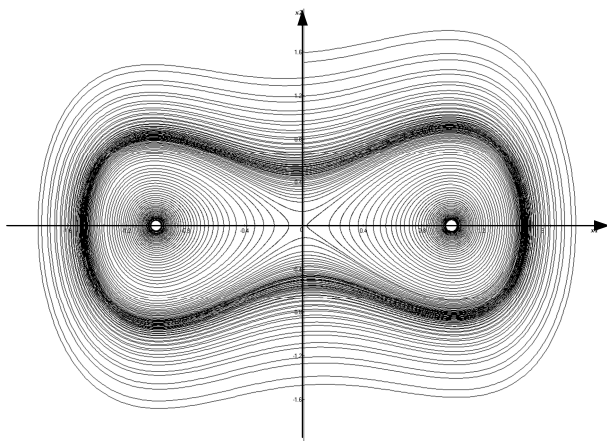


Рис. 7. Значение параметра  $k = 1,36$

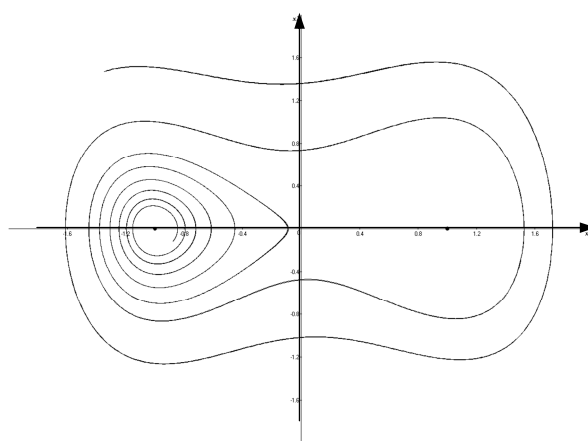


Рис. 8. Значение параметра  $k = 2,0$

Рис. 3–8 построены при фиксированном значении  $\mu = 0,1$ . При этом параметры  $k_1 = 1,25$ ,  $k_2 = 1,36$  найдены численно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хорошо известно, что большинство явлений окружающего мира являются нелинейными. Поэтому в конце XIX и начале XX веков число нелинейных задач, решение которых уже нельзя было отложить на будущее, начало возрастать. Ранее эти проблемы были связаны лишь с нелинейной механикой: это задача трех тел, описание волн на поверхности жидкости и ряд других. Однако в 20-30-е годы прошлого столетия нелинейные задачи превратились в первоочередные проблемы в акустике, физике твердого тела, статистической физике. Принципиально нелинейные задачи ставились зарождающейся радиотехникой (детектирование и генерирование колебаний). Значительный вклад в становление науки о нелинейных колебаниях внес наш соотечественник А.А. Андронов и созданная им научная школа в Нижнем Новгороде. Главное отличие нелинейных математических моделей от линейных состоит в том, что во многих случаях решение линейных уравнений удается найти в явном виде с помощью специальных функций. Еще со школы нам хорошо известны элементарные функции:  $\sin t$ ,  $\operatorname{tg} t$ ,  $\exp t$  и др.; есть более сложные – полиномы Чебышева, Лежандра, функции Бесселя, Ханкеля, Эйри и т.п., изучаемые на физико-математических факультетах университетов. Все перечисленные функции являются решениями линейных уравнений и хорошо изучены. Для большинства же важных нелинейных уравнений, которые необходимо исследовать, невозможно найти решение в аналитическом виде. Их анализ часто требует синтеза аналитических методов, каковыми являются методы качественного анализа, с вычислительным экспериментом. При этом компьютер дает возможность не только проводить расчеты с большой степенью точности, но и исследовать сложные нелинейные модели при помощи ряда целенаправленных численных экспериментов. Сегодня возникла необходимость формирования такой культуры у обучающихся, которая синтезировала бы в себе, с одной стороны, теоретические знания, с другой – владение методами математического моделирования с использованием современных программных продуктов. Формирование такой культуры желательно вести перманентно [7–9], начиная с первого курса, и в широком спектре учебных дисциплин: математике, информатике, физике, электротехнике, радиотехнике и др.

### Список используемых источников

1. *Треногин В.А.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 312 с.
2. *Морозов А.В., Бригаднов И.А.* Математические основы теории систем. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. – 232 с.
3. *Белых В.Н.* Элементарное введение в качественную теорию и теорию бифуркаций динамических систем // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 1. – С. 115–121.
4. *Арнольд В.И.* Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 304 с.
5. *Морозов А.В.* Качественная теория дифференциальных уравнений – основная составляющая теории динамических систем // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 642. – С. 177–184.
6. *Морозов А.Д., Драгунов Т.Н.* Визуализация и анализ инвариантных множеств динамических систем. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 304 с.
7. *Булекбаев Д.А., Катранов А.Г., Морозов А.В.* Формирование компетенций в курсе математики // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 648. – С. 192–201.
8. *Алтухов А.И., Калинин В.Н., Чебурков М.А.* Об опыте формирования и оценивания компетенций по дисциплинам профессионального цикла в системе военного образования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 650. – С. 204–210.
9. *Булекбаев Д.А., Морозов А.В.* Исследование динамических систем в WinSet // Математика в вузе и школе: труды национальной научно-методической конференции. Санкт-Петербург, сентябрь – октябрь 2017 г. / под ред. В.Г. Дегтярева. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – С. 74–77.

Е.А. Новиков,  
*доктор техн. наук, доцент;*

Д.А. Севастьянов,  
*кандидат техн. наук*

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры»;

И.С. Топорков,  
*кандидат техн. наук*

Командование Космических войск Российской Федерации;

А.С. Фадеев,  
*доктор техн. наук, профессор*

Публичное акционерное общество «Центральное научно-производственное объединение «Каскад»;

К.Ю. Цветков,  
*доктор техн. наук, профессор*

## **УЧЕБНЫЙ ТРЕНИРОВОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В публикации изложены актуальные вопросы разработки учебно-тренировочного комплекса для подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения. Сформулирован подход к решению проблемы комплексного использования образовательных программ, информационно-образовательных и учебно-тренировочных средств, а также методик и технологий обучения при проведении различных видов занятий в системах высшего, среднего и дополнительного профессионального образования. Внедрение учебного тренировочного комплекса в практику подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения позволило в полной мере обеспечить требования ФГОС 3++.

Ключевые слова: инфокоммуникационные средства космического назначения, профессиональные компетенции, учебный тренировочный комплекс, учебно-тренировочное средство, информационно-образовательные средства, методики и технологии обучения.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Обеспечение запусков ракет космического назначения, а также управления орбитальной группировкой космических аппаратов во многом определяется качеством подготовки специалистов по эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры. Среди объектов наземной космической инфраструктуры особое место занимают инфокоммуникационные комплексы космического назначения, обеспечивающие связь и передачу данных между всеми субъектами космической деятельности. При этом роль системы подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения трудно переоценить. Развитие телекоммуникационных технологий в XX веке в значительной степени затронуло и инфокоммуникационные средства космического назначения. Однако система подготовки кадров в этой достаточно наукоемкой области знаний оказалась не в полной мере готовой к произошедшему технологическому рывку. Кроме того, ситуация в области образования в известной степени осложнилась в связи с начавшимся в 2005 году переходом к Болонской системе образования [1].

## **РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО ТРЕНИРОВОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Действующий на 2010 год федеральный государственный стандарт (ФГОС) 3-го поколения 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи» определял требования к знаниям, умениям и навыкам специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения. При этом проблематичным оказалось формирование нужного набора навыков ввиду очевидного несоответствия учебно-материальной базы вузов, а также методик и технологий практического освоения инфокоммуникационных средств космического назначения современным и перспективным требованиям образовательных стандартов. В результате анализа состояния дел в области обеспечения космической отрасли России специалистами высокого уровня в период с 2010 по 2012 годы было определено актуальное направление модернизации системы подготовки кадров по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи» на основе разработки учебного тренировочного комплекса для подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения.

Общая хронология работ по созданию учебного тренировочного комплекса для подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения показана на рис. 1.

Работа по анализу степени удовлетворения требований федерального государственного стандарта проводилась с 2010 по 2016 год в рамках следующих комплексных научно-исследовательских работ:

- «Совершенствование системы непрерывной подготовки военных специалистов Вооруженных Сил Российской Федерации на основе реализации современных требований к профессиональной деятельности выпускников высших военно-учебных заведений» (шифр «Профессионал-14»);
- «Комплексное исследование проблемных вопросов и обоснование направлений развития системы военного образования Вооруженных Сил Российской Федерации на период до 2020 года» (шифр «Образованность»);
- «Совершенствование подготовки военных кадров в образовательных учреждениях Минобороны России на основе прогрессивных технологий обучения» (шифр «Контрагент-51»);
- «Порядок проведения проверок и мониторинга военных образовательных учреждений Министерства обороны Российской Федерации» (шифр «Родословец»).

Так, в рамках КНИР «Профессионал-14» были выполнены:

- анализ качества подготовки выпускников Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи» (специализация № 6 «Сети и системы связи космических комплексов») на основании отзывов из войск;
- анализ качества профессионально-должностной подготовки личного состава, эксплуатирующего комплексы, системы и средства связи космического назначения на космодроме Плесецк, а также в частях Главного испытательного космического центра им. Г.С. Титова.

Кроме того, в тот же период времени аналогичная работа проводилась на базе Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и Амурского государственного университета [2], где были выполнены:

- анализ востребованности выпускников этих вузов по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи»;

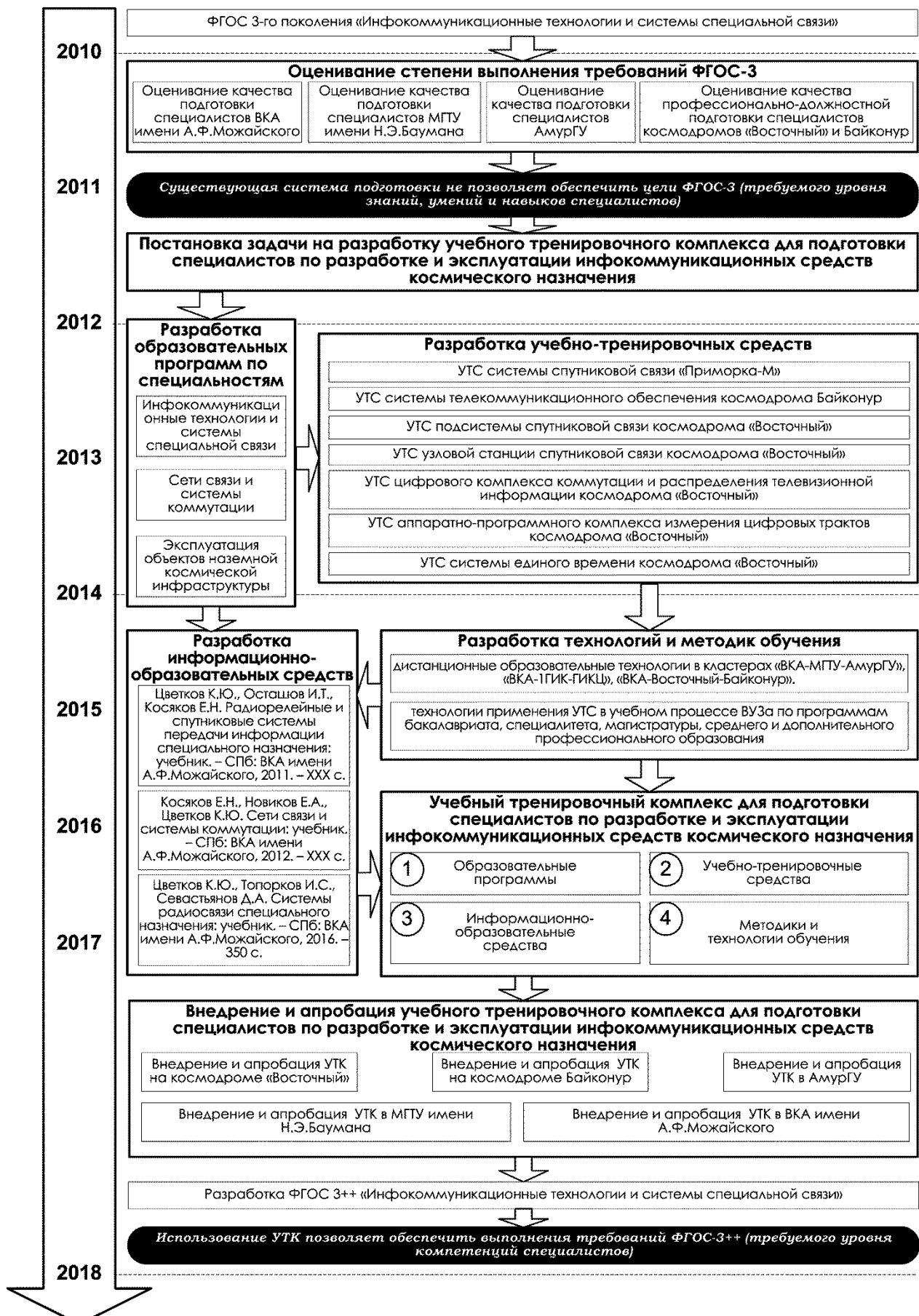


Рис. 1. Хронология выполнения работ по созданию УТК



– оценивание и анализ уровня профессиональных навыков специалистов по связи в условиях эксплуатирующих организаций, а именно, космодромов Байконур и «Восточный».

В результате проведенного комплекса работ по анализу текущего состояния дел были выявлены следующие негативные тенденции:

– требования ФГОС-3 по формированию необходимой совокупности компетенций специалистов не выполняются в полной мере;

– выпускники Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского по специальности 11.05.04 имеют 50% удовлетворительных, 40% хороших и 10% отличных оценок в отзывах из войск;

– выпускники МГТУ им. Н.Э. Баумана и АмурГУ по специальности 11.05.04 оказываются не в полной мере востребованными на рынке труда;

– система профессиональной и профессионально-должностной подготовки в эксплуатирующих организациях основывается на устаревшей учебно-методической базе, не использует современные технические средства обучения (ТСО) и, в частности, учебно-тренировочные средства, и не может обеспечить требуемый уровень подготовки специалистов к самостоятельной работе;

– система дополнительного профессионального образования в значительной мере имеет формальный характер, не использует современные ТСО и не позволяет сформировать требуемый набор навыков практической работы на современной технике связи.

Решение задачи повышения качества подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения связано во многом с улучшением практических навыков работы специалистов, а также овладением ими на требуемом уровне следующими компетенциями:

– способностью обосновывать и оценивать технические характеристики космических бортовых и наземных комплексов связи, комплексов связи с пилотируемыми космическими аппаратами, связанных комплексов космических аппаратов различного целевого назначения и разрабатывать предложения по их совершенствованию;

– способностью проводить сеансы телевизионной, радиотелефонной связи, сеансы обмена данными с пилотируемыми космическими аппаратами и орбитальными станциями, а также применять по назначению инфокоммуникационные системы космических комплексов;

– способностью осуществлять управление ресурсами наземной, телекоммуникационной сети и администрирование сети связи космических комплексов;

– способностью обеспечить информационное взаимодействие космических радиотехнических комплексов управления, навигации, телеметрии и службы единого времени в контуре управления орбитальной группировкой космических аппаратов различного целевого назначения;

– способностью анализировать причины отказов в составных каналах связи в телекоммуникационных сетях космических комплексов, в радиотехнических комплексах управления и навигации, восстанавливать работоспособность телекоммуникационных систем космических комплексов.

Здесь необходимо отметить, что сам объект эксплуатации – инфокоммуникационные средства космического назначения – представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных систем и средств инфокоммуникаций различного целевого назначения. Среди них такие подсистемы связи, как транспортная система связи космодрома, построенная на основе магистральных волоконно-оптических систем передачи и радиорелейных систем связи, сеть спутниковой связи, цифровой комплекс коммутации и распределения телевизионной информации, система оперативно-командной связи, аппаратно-программные комплексы измерения цифровых трактов и системы обмена информацией, система связи с пилотируемыми космическими аппаратами, система единого времени и тактовой сетевой синхронизации, система подвижной транкинговой связи, система телефонной связи и пр. Очевидно, что подготовка специалистов требуемого уровня, владеющих навыками разработки и эксплуатации перечис-

ленных систем связи космодрома, не может опираться только на освоение теоретических основ построения таких систем и должна в значительной мере использовать преимущества современных подходов к освоению практических навыков работы с использованием учебно-тренировочных средств и тренажеров. Это подчеркивает актуальность работ в направлении создания и развития учебно-тренировочных средств для подготовки специалистов по связи необходимость формирования кадрового состава строящегося космодрома «Восточный», использующего в настоящее время для организации пусковых работ кадровый потенциал специалистов космодрома Байконур.

Разработка и использование ТСО в учебном процессе становится всё более востребованным направлением ввиду выявленных преимуществ перед использованием в учебных целях штатной техники. С точки зрения экономической целесообразности эффективнее проводить учебные тренировки на учебно-тренировочных средствах (УТС) вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), так как это не приводит к преждевременному износу ВВСТ и не снижает, таким образом, готовность подразделения к выполнению задач по предназначению. Помимо этого тренировка на ТСО обладает большим, по сравнению с тренировкой на боевой технике, потенциалом в формировании компетенций, а именно:

- обеспечивает безопасность при действиях обучающегося в критических и аварийных ситуациях, что создает возможность развития его самостоятельности при принятии решений;
- есть возможность создания практически любой реальной обстановки и ситуации;
- предлагается последовательное освоение действия за счет разложения сложных элементов на простые с постепенным усложнением;
- многократное повторение позволяет довести действия до уровня безошибочных за счет объективности оценки, контроля и демонстрации правильных действий;
- формирование компетенции происходит через создание руководителем условий, необходимых для выполнения определенной задачи.

Результатом проведенных исследований стало задание на разработку учебного тренировочного комплекса для подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения, двумя основными задачами которого являются реализация в полной мере образовательной программы на основе нового образовательного стандарта ФГОС 3++, а также обеспечение требуемого уровня подготовки (требуемого уровня компетенций) специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения.

Базовым элементом УТК являются образовательные программы высшего, среднего и дополнительного профессионального образования по специальностям «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи», «Сети связи и системы коммутации», «Эксплуатация объектов наземной космической инфраструктуры». Перечисленные образовательные программы формируют модель специалиста по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения, определяют логику его развития от младшего технического состава через систему повышения квалификации до руководящего состава.

Связующим элементом УТК, без которого использование УТК теряет смысл, является система взаимоувязанных территориально-распределенных учебно-тренировочных средств (УТС), таких как:

- УТС системы спутниковой связи «Приморка-М», разработанные в рамках ОКР по созданию модернизированной системы спутниковой связи «Приморка-М»;
- УТС системы телекоммуникационного обеспечения космодрома Байконур, разработанные в рамках СЧ ОКР «Байконур-НКИ-СТО/ВКА-2014»;
- УТС подсистемы спутниковой связи космодрома «Восточный», разработанные в рамках СЧ ОКР «НКИ-Восток-НИИР-ВКА/2013-2014»;
- УТС узловой станции спутниковой связи космодрома «Восточный», разработанные в рамках СЧ ОКР «НКИ-Восток-ЯРЗ-ВКА/УССС-2014»;

- УТС цифрового комплекса коммутации и распределения телевизионной информации космодрома «Восточный», разработанные в рамках СЧ ОКР «НКИ-Восток-НИИТ-ВКА/2013-2014»;
- УТС аппаратно-программного комплекса измерения цифровых трактов космодрома «Восточный», разработанные в рамках СЧ ОКР «НКИ-Восток-ЯРЗ-ВКА/2013-2014»;
- УТС системы единого времени космодрома «Восточный», разработанные в рамках СЧ ОКР «НКИ-Восток-УТС-СЕВ».

Все УТС, за исключением УТС «Приморка-М», размещенных только в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, развернуты на космодромах Байконур и «Восточный», а также в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, МГТУ им. Н.Э. Баумана и Амурском ГУ. Структура УТС показана на рис. 3 на примере УТС типового комплекса инфокоммуникационных средств космодрома.

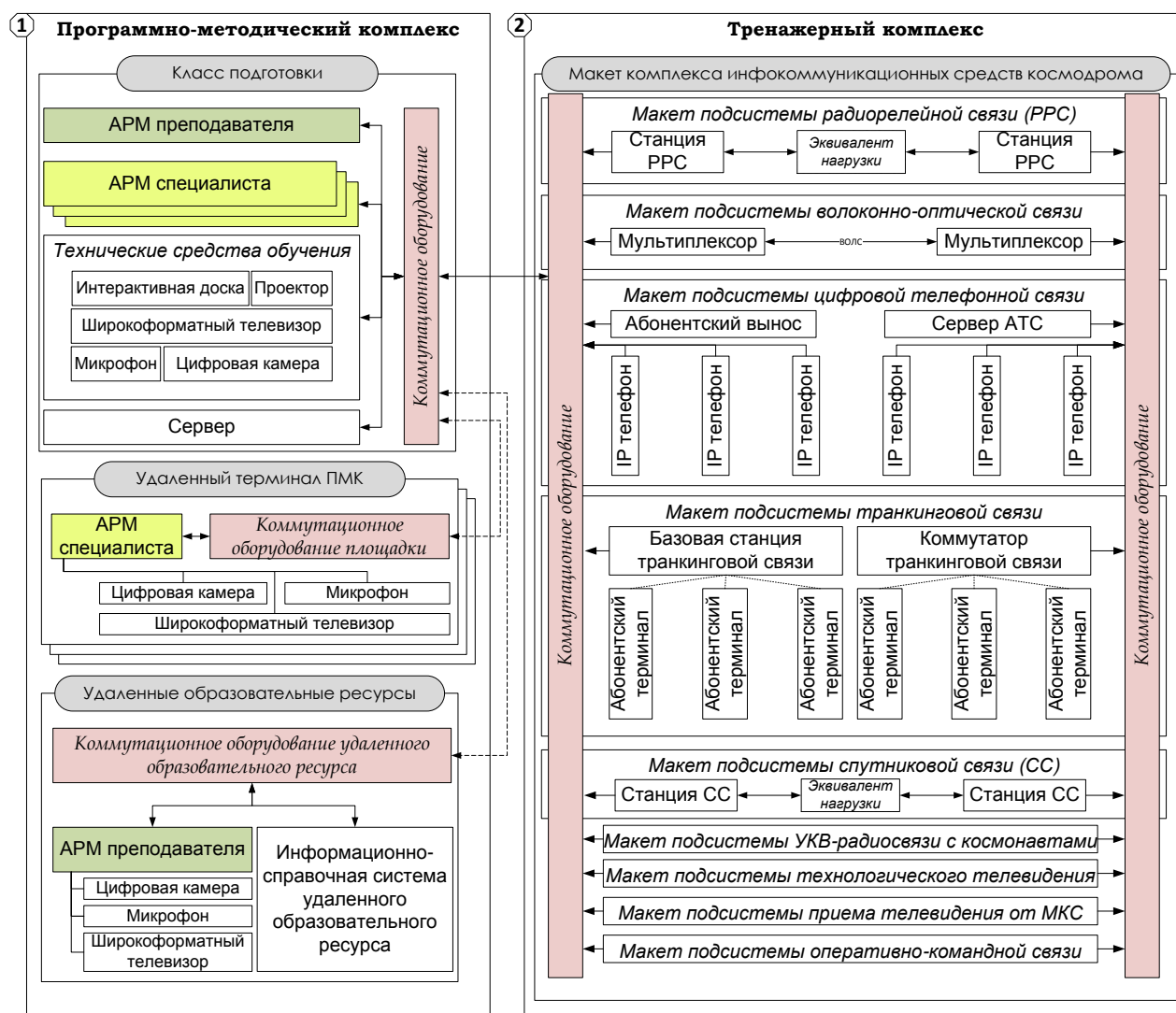


Рис. 2. Структура УТС типового комплекса инфокоммуникационных средств космодрома

Учебно-тренировочные средства реализуют функции практической отработки навыков эксплуатации оборудования инфокоммуникационных систем космического назначения, контроля знаний и уровня усвоения навыков, а также предоставляют возможности для реализации технологий и методик дистанционного образования.

Информационно-образовательные средства [3–9] являются элементом УТК, отвечающим за формирование и наглядное представление теоретической основы в области разработки и эксплуатации инфокоммуникационных средств. Информационно-образовательные средства [3–9] обеспечивают изучение дисциплин 4 модуля образовательной программы, формирующих профессиональные и профессионально-специализированные компетенции специалистов, а также выполнение квалификационных требований и профессиональных стандартов, предъявляемых и формулируемых заказчиками подготовки специалистов.

Элементом УТК, реализующим образовательные программы за счет использования возможностей, предоставленных учебно-тренировочными средствами, и теоретической поддержки, формируемой информационно-образовательными средствами, являются методики и технологии обучения, а именно:

- технологии применения УТС в учебном процессе вуза по программам бакалавриата, специалитета, магистратуры, среднего и дополнительного профессионального образования;
- дистанционные образовательные технологии в кластерах «ВКА – МГТУ – АмурГУ», «ВКА – Космодром Плесецк – Главный испытательный космический центр», «ВКА – Космодром «Восточный» – Космодром Байконур».

### ВНЕДРЕНИЕ И АПРОБАЦИЯ УЧЕБНОГО ТРЕНИРОВОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Организация работ по созданию, внедрению и апробации учебного тренировочного комплекса для подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения (рис. 3) включала в себя следующие мероприятия:

- 1) разработку Космическими войсками квалификационных требований и формирование заказа на подготовку специалистов;

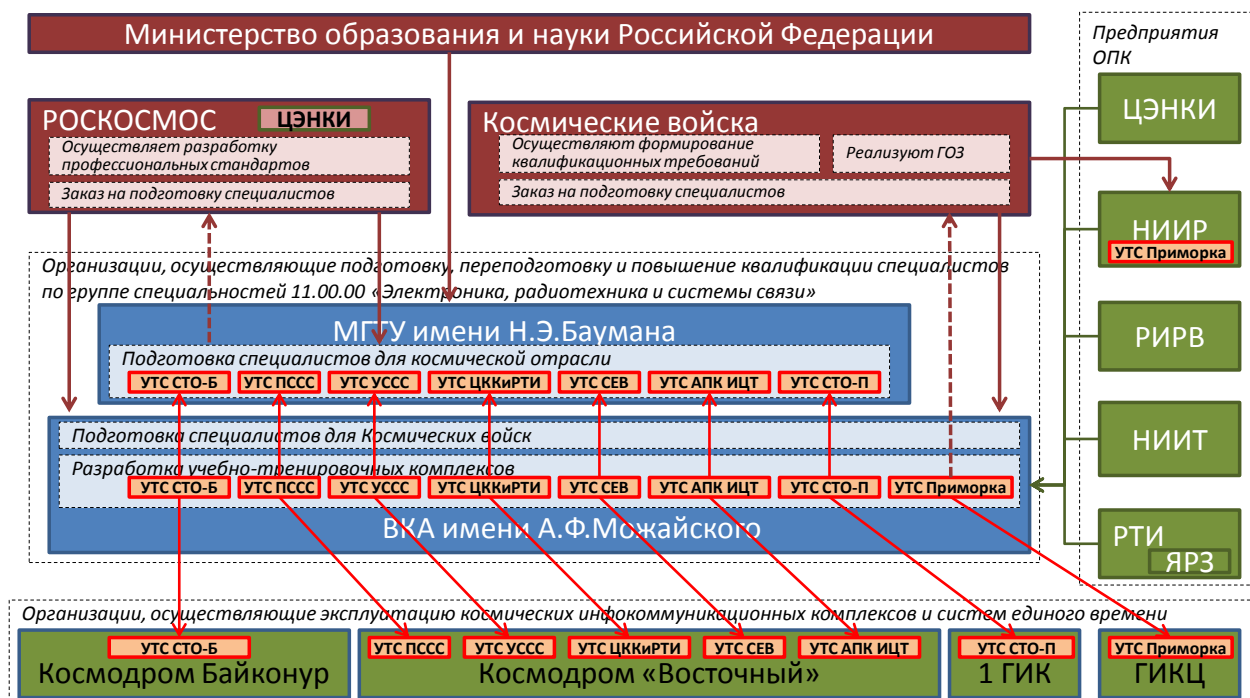


Рис. 3. Система взаимодействия участников подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения

2) разработку Российским космическим агентством совместно с ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» профессиональных стандартов и формирование заказа на подготовку специалистов;

3) разработку Военно-космической академией им. А.Ф. Можайского и Московским государственным техническим университетом им. Н.Э. Баумана в составе кооперации федерального учебно-методического объединения ФГОС 3, ФГОС 3+ и ФГОС 3++, а также соответствующих образовательных программ по специальности 11.05.04;

4) обоснование необходимости и последующее формирование от Роскосмоса и Космических войск заказов на разработку учебно-тренировочных средств;

5) создание учебно-тренировочных средств Военно-космической академией А.Ф. Можайского, Научно-исследовательским институтом Радио, Российским институтом радионавигации и времени, Научно-исследовательским институтом телевидения, Ярославским радиозаводом;

6) развертывание учебно-тренировочных средств на базе ВКА им. А.Ф. Можайского, МГТУ им. Н.Э. Баумана, АмурГУ, космодромов Байконур, «Восточный» и Плесецк;

7) разработку информационно-образовательных средств, методик и технологий обучения коллективами ВКА им. А.Ф. Можайского, МГТУ им. Н.Э. Баумана и АмурГУ;

8) внедрение и апробацию учебно-тренировочных и информационно-образовательных средств, методик и технологий обучения в учебном процессе ВКА им. А.Ф. Можайского, МГТУ им. Н.Э. Баумана и АмурГУ в ходе реализации образовательных программ высшего, специального и дополнительного профессионального образования, а также в системах профессиональной и профессионально-должностной подготовки персонала космодромов Байконур, «Восточный» и Плесецк;

9) коррекцию содержания образовательных программ, учебно-тренировочных и информационно-образовательных средств, методик и технологий обучения и формирование на их основе ФГОС 3++.

Реализация перечисленных мероприятий на каждом из этапов фиксировалась соответствующими актами выполненных работ, отчетами о выполненной работе, актами приемки-сдачи работ, актами внедрения, реализации и использования, свидетельствами на электронный ресурс. Результаты работы нашли отражение в ряде публикаций [10–12], учебниках и учебных пособиях [3–9].

Анализ совокупности полученных результатов позволяет утверждать, что учебный тренировочный комплекс для подготовки специалистов по разработке и эксплуатации инфокоммуникационных средств космического назначения позволяет реализовать образовательную программу на основе нового образовательного стандарта и обеспечить требуемый уровень подготовки (компетенций) специалистов.

### Список используемых источников

1. О реализации положений Болонской декларации в системе высшего профессионального образования Российской Федерации: приложение: Приказ № 40 от 15 фев. 2005 г. / Министерство образования и науки Российской Федерации. – 2005.

2. Радионов Н.В., Каргу Д.Л., Фадеев А.С. Формирование инновационно-инвестиционного территориального кластера для обеспечения создания и эксплуатации космодрома «Восточный» // Вопросы электромеханики: труды ВНИИЭМ. – 2013. – Т. 133, №. 2. – С. 31–38.

3. Косяков Е.Н., Новиков Е.А., Цветков К.Ю. Сети связи и системы коммутации: учебник. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 329 с.

4. Цветков К.Ю., Акмолов А.Ф., Ефимов С.Н. Системы многоканальной связи специального назначения: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 131 с.

5. *Цветков К.Ю., Акмолов А.Ф., Коровин В.М.* Теория электрической связи. Задачи и решения: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. – 116 с.
6. *Цветков К.Ю., Ефимов С.Н., Остахов И.Т.* Защита инфокоммуникационных систем и сетей: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. – 157 с.
7. *Цветков К.Ю., Остахов И.Т., Косяков Е.Н.* Радиорелейные и спутниковые системы передачи информации специального назначения: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 447 с.
8. *Цветков К.Ю., Севастьянов Д.А., Новиков Е.А.* Программно-методический комплекс для подготовки специалистов по эксплуатации телекоммуникационной инфраструктуры космодрома «Восточный» // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2015. – №. 2. – С. 91–102.
9. *Цветков К.Ю., Топорков И.С., Севастьянов Д.А.* Системы радиосвязи специального назначения: учебник. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. – 350 с.
10. *Севастьянов Д.А.* Вопросы инновационного развития и эксплуатации инфокоммуникационной инфраструктуры космодрома «Восточный» // Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ООО «Арт-Экспресс», 2016. – С. 6–9.
11. Система мониторинга и поддержки эксплуатации телекоммуникационной инфраструктуры космодрома «Восточный» / Д.А. Севастьянов, Е.А. Новиков, С.Ю. Рыбаков, А.М. Иванов, К.Ю. Цветков // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2015. – №. 2. – С. 28–37.
12. Интеграция образования, науки и производства: модель Бауманского университета / А.С. Фадеев, В.Н. Герди, В.К. Балтян, В.Г. Фёдоров // Высшее образование в России. – 2016. – №. 4.

Г.К. Осипов,  
*доктор географических наук, профессор;*  
В.В. Хиленко

## **МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СФОРМИРОВАННОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ У КУРСАНТОВ ВЫСШИХ ВОЕННО-УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

Изложена сущность методики разработки тестовых заданий для оценки сформированности профессиональных компетенций курсантов высших военно-учебных заведений. Рассмотрены ее основные блоки, включающие в себя формирование экспертной группы, отбор диагностируемого материала, проектирование тестовых заданий, экспертизу информативности тестовых заданий и теста в целом. Приведены результаты апробации созданной методики на кафедре картографии Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского на примере создания тестовых заданий для дисциплины «Геоинформационное картографирование».

Ключевые слова: тестовое задание, тест, экспертная группа, оценка компетентности экспертов, матрица компетенций, мягкое рейтинговое оценивание, диагностическая и дифференцирующая способность тестового задания.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время одной из важнейших задач, стоящих перед специалистами высших военно-учебных заведений Российской Федерации является разработка и внедрение в практику научно-методических подходов к процедуре оценки профессиональных компетенций курсантов. Одной из ее важнейших составляющих является разработка фондов оценочных средств, являющихся обязательным элементом рабочих программ учебных дисциплин. Подавляющее большинство разрабатываемых оценочных средств представляют собой совокупность тестовых заданий. Несомненно, что применение тестов, в том числе с использованием специализированных тестирующих программ, существенно повышает качество и эффективность контроля знаний обучающихся [1, 2, 4]. Однако следует учитывать, что в настоящее время тестовые задания, применяемые для оценки уровня сформированности компетенций, недостаточно эффективны [6]. Поэтому в педагогической практике до настоящего времени остается актуальной проблема разработки тестовых заданий, особенно для оценки сформированности профессиональных компетенций курсантов [8, 10, 11]. К сожалению, часто тестовые задания разрабатывают без определения их надежности, шкалирования результатов и их статистической обработки. Соответственно итоговая оценка, получаемая из соотношения количества правильных ответов и заданных вопросов, не позволяет адекватно оценить достижения курсанта, что резко снижает эффективность тестирования. В связи с этим возникло противоречие между необходимостью широкого использования процедуры тестирования при оценке сформированности профессиональных компетенций курсантов и недостаточной разработанностью научно-методических подходов к ее реализации. В данной публикации авторы сделали попытку частичного разрешения этого противоречия.

### **МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

Разработку тестовых оценочных средств необходимо осуществлять на основе системного подхода, обеспечивающего обоснованный выбор видов и форм заданий, построение стандартизованных шкал и интерпретацию результатов оценивания с высокой надежностью, валид-

ностью и сопоставимостью [9]. Для решения данной задачи авторами разработана методика, состоящая из пяти блоков, кратко рассмотрим содержание каждого из них.

**Блок 1. Подготовительные работы.** Данный этап начинается с формирования рабочей группы, которая формулирует цели и задачи оценивания, анализирует нормативные документы, определяющие результаты образовательной деятельности в терминах компетенций.

**Блок 2. Формирование экспертной группы.** На данном этапе рассчитывается численность экспертной группы, определяются кандидаты в эксперты, оценивается их компетентность и наиболее подготовленные из них включаются в состав группы.

Расчет численности экспертной группы предлагается осуществлять по зависимости, приведенной в работе Г.Г. Азгальдова [3]:

$$N_0 = \frac{\varphi d^2}{\Delta g^2 (1 - \gamma)}; \quad (1)$$

$$d = d_{\max} - d_{\min}, \quad (2)$$

где  $d$  – размах оценочной шкалы;  
 $\Delta g$  – абсолютная погрешность коллективной экспертной оценки;  
 $\gamma$  – доверительная вероятность;  
 $\varphi$  – коэффициент, зависящий от величины  $\gamma$ .

Кандидаты в эксперты выбираются из числа опытных методистов, ученых и представителей Заказчика подготовки.

Для определения компетентности кандидатов в эксперты предлагается использовать следующую зависимость:

$$K_j = 0,60 \times K_j^{B3} + 0,40 \times K_j^C, \quad (3)$$

где  $K_j$  – интегральный показатель компетентности кандидата в эксперты;  
 $K_j^{B3}$  – балл взаимной оценки компетентности кандидата в эксперты;  
 $K_j^C$  – балл самооценки компетентности кандидата в эксперты.

Кратко рассмотрим сущность и особенности определения каждого из перечисленных показателей.

Взаимная оценка компетентности кандидата в эксперты позволяет определить уровень его подготовленности к экспертизе исходя из мнения коллег. Значение взаимной оценки компетентности кандидата в эксперты определяется как средняя величина из значений оценок, назначенных остальными кандидатами в эксперты. Для практической реализации процедуры взаимной оценки используются два подхода.

*Первый подход* применяется при количестве кандидатов в эксперты менее 15 человек и в том случае, если в рассматриваемом коллективе нет групп, которые искусственно формируют завышенные приоритеты одних кандидатов в эксперты и заниженные других. В процессе его реализации каждый кандидат в эксперты назначает количественные оценки, характеризующие компетентность своих коллег. Затем рассчитывается средняя оценка по каждому кандидату в эксперты. В основу данного подхода закладывается предположение, что существует непосредственная связь между компетентностью специалиста и усредненной оценкой, которую он получает от своих коллег по работе.

*Второй подход* применяется при количестве кандидатов в эксперты более 15 человек. В данном случае процедура оценки компетентности кандидатов в эксперты проходит в следующей последовательности.

1. Из состава экспертной группы каждый кандидат в эксперты формирует несколько подгрупп, соответствующих уровням квалификации входящих в них кандидатов в эксперты, допустим – 3 подгруппы: 1) квалификация выше среднего уровня; 2) квалификация среднего уровня; 3) квалификация ниже среднего уровня. При этом число кандидатов в эксперты в подгруппе должно быть не более 50 % от общего состава экспертной группы.



2. Затем кандидат в эксперты ранжирует своих коллег, входящих в каждую подгруппу, по их компетентности (от 1 до  $m$ ), где  $m$  – число кандидатов в эксперты в подгруппе.

3. В заключение для каждого кандидата в эксперты рассчитывается балл компетентности с учетом назначенного диапазона изменения оценок в рассматриваемой подгруппе (с точностью до 1,0 или 0,5 балла).

На основе оценок компетентности кандидатов в эксперты, полученных с использованием первого или второго подходов, формируется матрица (табл. 1) и определяется средняя оценка компетентности каждого кандидата в эксперты с использованием следующей зависимости:

$$K_j^{B3} = \sum_{i=1}^n a_{ij} / n, \quad (4)$$

где  $a_{ij}$  – оценка компетентности, выставленная  $i$ -му кандидату в эксперты  $j$ -м;  
 $n$  – число кандидатов в эксперты, оценивающих компетентность  $i$ -го кандидата.

Если какой-то кандидат в эксперты плохо знает кого-то из своих коллег, то при заполнении матрицы он должен сделать прочерк в соответствующей графе.

Таблица 1

### Пример матрицы взаимной оценки компетентности экспертов

Оцениваемые эксперты	Оценивающие эксперты					Сумма оценок	Средняя оценка
	1	2	3	.....	$n$		
1	–	$a_{21}$	$a_{31}$	.....	$a_{n1}$		
2	$a_{12}$	–	$a_{32}$	.....	$a_{n2}$		
3	$a_{13}$	$a_{23}$	–	.....	$a_{n3}$		
.....	.....	.....	.....	.....	.....		
$n$	$a_{1n}$	$a_{2n}$	$a_{3n}$	.....	–		
Всего:							

Самооценка компетентности кандидата в эксперты позволяет определить его информированность в предметной области. Значение самооценки рассчитывают по следующей зависимости:

$$K_j^C = \sum_{i=1}^n m_i Y_i, \quad (5)$$

где  $m_i$  – весомость  $i$ -го показателя компетентности кандидата в эксперты;  
 $Y_i$  – значение оценки  $i$ -го показателя компетентности кандидата в эксперты;  
 $n$  – количество показателей, характеризующих компетентность кандидата в эксперты.

Значения  $m$  и  $Y$  определяются рабочей группой. Если  $\sum m = 1$ , а  $0 \leq Y \leq 10$ , то  $0 \leq K_j^C \leq 10$ .

По результатам экспертной оценки наиболее подготовленные кандидаты включаются в состав экспертной группы. При этом считается, что для включения в экспертную группу кандидат в эксперты должен набрать не менее 6 баллов из 10 возможных.

**Блок 3. Отбор диагностируемого материала и его распределение по содержательной значимости.** На данном этапе для каждой профессиональной компетенции определяются учебные дисциплины, ее формирующие. Для этого используется матрица компетенций, представляющая собой документ, объединяющий образовательную программу и образовательный стандарт в части результатов подготовки специалиста определенного профиля (табл. 2).

Таблица 2

## Пример матрицы компетенций

Наименование дисциплин (модулей), практик	Универсальные компетенции						Общепрофессиональные компетенции									Профессиональные компетенции									
	УК-1	УК-2	УК-3	УК-4	УК-5	УК-6	.....	ОПК-1	ОПК-2	ОПК-3	ОПК-4	ОПК-5	ОПК-6	ОПК-7	ОПК-8	ОПК-9	.....	ПК-1	ПК-2	ПК-3	ПК-4	ПК-5	ПК-6	ПК-7	.....
Общее землеведение		+						+					+				+	+							
Общая картография		+			+				+		+		+							+		+			
.....	...	...	...	...	...	...	.....	...	...	...	...	...	...	...	...	...	.....	...	...	...	...	...	...	...	.....
Геоинформационное картографирование	+					+		+				+										+	+		

Матрица компетенций строится на основе учебного плана и федерального образовательного стандарта. Она предназначена для наглядного отображения элементов образовательной программы, формирующих компетенции подготавливаемого специалиста.

После определения перечня учебных дисциплин, формирующих анализируемую профессиональную компетенцию, для каждой из них осуществляется ранжирование структурных элементов (разделов, тем, учебных вопросов) по их содержательной значимости для формирования компетенции. Оно начинается с определения экспертным методом для каждого структурного элемента ненормированных весомостей. Для их определения предлагается использовать стратегию мягкого рейтингового оценивания, заключающуюся в том, что максимально допустимое отклонение ненормированной весомости элемента любого структурного уровня от среднего значения не должно превышать 5 % в большую или меньшую сторону [12].

Ненормированные весомости составных частей структурных элементов, занимающие промежуточные места в рейтинговом интервале, распределяются таким образом, чтобы их суммарный показатель внутри каждого структурного элемента был равен 100 %. При этом интервалы между численными значениями ненормированных весомостей структурных элементов исследуемой дисциплины могут выбираться произвольно с учетом их содержательной значимости.

Например, учебная дисциплина, участвующая в формировании анализируемой профессиональной компетенции, имеет три раздела, каждый из которых содержит пять тем, включающих по четыре учебных вопроса. Согласно требованию стратегии мягкого рейтингового оценивания будем иметь:

- 1) для разделов: 38 % – 34 % – 28 %;
- 2) для тем: 25 % – 22 % – 20 % – 18 % – 15 %;
- 3) для вопросов: 20 % – 23 % – 27 % – 30 %.

Причем сумма ненормированных весомостей в пределах каждого структурного элемента должна быть равна 100 %.

После определения для каждого структурного элемента рабочей программы ненормированных весомостей рассчитываются нормированные весомости каждого учебного вопроса. Для этого используют следующую зависимость:

$$\bar{P}_{vk} = N_R P_{Ri} \times N_{Ti} P_{Tji} \times N_{Vj} P_{Vkj} / 100000, \quad (6)$$

где  $\bar{P}_{vk}$  – нормированная весомость  $k$ -го учебного вопроса;

$N_R$  – количество разделов в изучаемой дисциплине;

$P_{Ri}$  – ненормированная весомость  $i$ -го раздела относительно всей изучаемой дисциплины;

$N_{Ti}$  – количество тем в  $i$ -м разделе;

$P_{Tji}$  – ненормированная весомерность  $j$ -й темы относительно  $i$ -го раздела;

$N_{Vj}$  – количество вопросов в  $j$ -й теме;

$P_{Vkj}$  – ненормированная весомерность  $k$ -го вопроса относительно  $j$ -й темы.

Согласно приведенной зависимости нормированная весомерность учебного вопроса рассчитывается путем перемножения количества иерархически связанных друг с другом разделов, тем и учебных вопросов на их средние ненормированные весомерности [12, 13].

Например, ненормированные весомерности иерархически связанных между собой раздела, темы и вопроса соответственно равны 20 %, 45 % и 33,4 %, тогда с учетом того, что учебная дисциплина имеет три раздела, каждый из которых содержит пять тем, включающих по четыре вопроса, нормированная весомерность учебного вопроса будет равна:

$$3 \times 20 \times 5 \times 45 \times 4 \times 33,4 / 100000 = 18,036. \quad (7)$$

После определения нормированной весомерности каждого учебного вопроса осуществляется их ранжирование по содержательной значимости для формирования анализируемой профессиональной компетенции. Ранжирование начинают с определения минимально допустимого уровня содержательной значимости учебного вопроса. Для этого предлагается использовать рекомендации, приведенные в работе [12]. С учетом этих рекомендаций авторы публикации предлагают разрабатывать по три тестовых задания для тех учебных вопросов, которые имеют нормированный весовой коэффициент более 10 баллов и по пять тестовых заданий для тех учебных вопросов, которые имеют нормированный весовой коэффициент более 15 баллов. Учебные вопросы, имеющие нормированный весовой коэффициент ниже 10 баллов в процесс тестирования не включаются и оцениваются при проведении занятий традиционными средствами текущего контроля (устный опрос, «летучки», контрольные работы и т.д.).

**Блок 4. Проектирование тестовых заданий для оценки сформированности профессиональных компетенций курсантов.** На данном этапе определяется уровень трудности тестовых заданий и принципы их расположения в тесте, осуществляется конструирование теста из набора тестовых заданий, составляются инструкции для курсантов и преподавателей по выполнению заданий, создаются эталоны (образцы) выполнения заданий. При этом под тестом понимается диагностическая система, предназначенная для оценки сформированности профессиональных компетенций курсантов, которая обладает целостностью, структурой и состоит из набора тестовых заданий. Удаление хотя бы одного тестового задания из теста приводит к снижению качества измерения сформированности компетенций. В тест должно включаться минимальное число заданий, обеспечивающее получение объективных результатов тестирования. При этом необходимо учитывать, что тестирование без указания предполагаемой интерпретации результатов не имеет научного смысла [5, 6, 7].

Каждый тест должен быть ориентирован на оптимальное время тестирования, уменьшение или превышение которого снижает качественные показатели теста. Оптимальное время тестирования определяется эмпирически, по показателю дисперсии тестовых данных.

Рекомендуемое время для выполнения одного тестового задания – не более 1,5–2 мин. Оптимальное время выполнения теста – 40–60 мин. Оптимальное число заданий в тесте – 30–40 заданий.

Каждый тип задания в тестовой форме должен включать в себя следующие универсальные элементы композиции:

1) инструкцию по выполнению тестовых заданий, набираемую курсивом. При автоматизированном тестировании инструкцию лучше выводить на экран вместе с каждым тестовым заданием, особенно это полезно при использовании в одном тесте разных типов заданий;

2) краткое содержание тестового задания. Оно не должно иметь повторов и неизвестных курсантам символов. В хорошем тестовом задании от 7 до 10 слов, хорошо, когда задания

содержат не более одного придаточного предложения. Задания должны формулироваться в логике высказываний, позволяющей легко установить истинность/ложность формулировки;

3) ответы к заданиям. Они должны быть короткими и понятными. Каждое тестовое задание должно иметь правильный ответ, желательно, чтобы все ложные ответы были дистракторами (правдоподобными, но неправильными ответами).

При компьютерном тестировании можно использовать задачи с генерируемыми переменными, решаемые с помощью встроенного в программу тестирования калькулятора. Эти задачи требуют выполнения определенных математических действий и глубокого знания учебного материала.

Выбор формы тестовых заданий зависит от учебной дисциплины, назначения теста, сложившихся традиций, ориентации на курсантов разных специальностей, возможностей компьютерной системы тестирования и других факторов.

Обычно предпочтение отдают тем формам тестовых заданий, в которых вероятность отгадать верный ответ близка или равна нулю. Маловероятно угадать верные ответы в заданиях с вычисляемым ответом, на установление соответствия, на определение правильной последовательности, на ранжирование, на заполнение пропусков (дополнение). Поэтому можно выбрать подходящие формы тестовых заданий, гарантирующие при соответствующем содержании и компьютерном тестировании объективность и надежность оценки знаний.

Для оценки сформированности профессиональных компетенций курсантов могут использоваться следующие типы тестовых заданий:

1. *Раскрытие понятий.* Испытуемому предлагается дать определение профессиональным понятиям, используя прилагаемые списки слов. Он должен мысленно построить фразу и затем выбрать слова, последовательное прочтение которых дает искомое определение.

2. *Анализ информационных таблиц.* Это тестовое задание используется для того, чтобы проверить, насколько понимает курсант предназначение тех или иных профессиональных действий, устройств, приборов. Такие задания весьма эффективны, когда действия курсанта четко регламентированы, подчиняются определенным правилам. Когда эти действия принципиально важны для решения профессиональных задач.

3. *Алгоритмизация профессиональных действий.* Данный тип тестовых заданий ориентирован на проверку практической подготовленности курсанта. С этой целью ему предлагается выбрать правильную последовательность действий при выполнении определенной профессиональной операции. При этом предлагается исходный список, в котором действия указаны в случайном порядке.

4. *Анализ графиков, диаграмм.* Данный тип тестового задания ориентирован на курсантов, которые в процессе профессиональной деятельности могут работать с различными графиками и диаграммами, включающими в себя важную профессиональную информацию.

5. *Выполнение мысленных вычислений, расчетов.* Нередко важным компонентом профессиональной компетентности военного специалиста является его способность к анализу количественных отношений, способность к расчетам и вычислениям. Здесь могут использоваться тестовые задания различного типа: сравнение величин и показателей, выбор нужных формул, поиск оптимальной схемы расчета и т.д.

6. *Процедуры анализа.* Аналитическая компетенция является необходимым элементом профессиональной подготовленности любого военного специалиста, так как ему приходится анализировать факты, явления, процессы, имеющие непосредственное отношение к его профессиональной сфере. При этом особенно важна способность к анализу скрытых, неявных смысловых связей и отношений.

Тестовое задание должно соответствовать материалам прочитанных лекций, рекомендуемых учебников, доступных курсантам инструктивно-методических материалов. Это особенно важно для новых методик расчетов, неоднозначно трактуемых понятий, терминов. Необходимо учитывать принципы отбора содержания учебного материала для тестовых заданий: значимость (наиболее важные, ключевые элементы знания); научная достоверность

(спорные точки зрения включать в тест не рекомендуется); соответствие уровню современного состояния науки (включение в тест не только достоверного, но и современного научного материала); репрезентативность (полнота содержания, достаточность для контроля); вариативность содержания (изменение теста по мере изменения содержания учебной дисциплины, количества часов, отводимых на ее изучение, разное соотношение простых и трудных заданий для слабых и сильных учебных групп); возрастающая трудность (от легких заданий, которые верно выполняет большинство курсантов, до самых трудных). Важно также соотношение теоретических и практических заданий.

**Блок 5. Экспертиза информативности тестовых заданий.** Для повышения эффективности тестирования должна быть определена информативность тестовых заданий и теста в целом. Для этого рекомендуется использовать контрольное тестирование, которое позволяет методом последовательных итераций (приближений) существенно улучшить качество тестовых заданий и повысить объективность оценки сформированности профессиональных компетенций курсантов [1, 2, 5].

Основными требованиями, которым должны отвечать тестовые задания, являются их диагностическая и дифференцирующая способности. Эти требования определяют возможность с помощью тестового задания получить объективную оценку теоретического уровня подготовки курсантов.

*Диагностическая способность.* Она характеризуется процентным отношением правильных ответов по тестовому заданию к общему числу тестируемых курсантов:

$$D_j = R_j / N \times 100, \quad (8)$$

где  $D_j$  – диагностическая способность  $j$ -го тестового задания, %;  
 $R_j$  – количество правильных ответов на  $j$ -тое тестовое задание;  
 $N$  – общее число тестируемых курсантов.

Диагностическая способность тестового задания снижается при приближении ее значения к 100 % или к 0, потому что в этих случаях сложно оценить уровень подготовки курсантов. На наш взгляд диагностическая способность тестового задания будет наиболее оптимальной, если она находится в интервале от 10 % до 85 %, т.е. если на тестовое задание отвечают не более 85 % курсантов и не менее 10 %.

Диагностическую способность тестового задания можно определить и другими методами, например путем расчета коэффициентов корреляции между баллами по тестовому заданию и баллами по всему тесту [2]. Данный подход к определению диагностирующей способности тестового задания применяется достаточно часто, хотя и не в полной мере отвечает строгим требованиям статистической теории. В этом случае для расчета коэффициента корреляции  $r_{xy}$  Пирсона формируются два вектор-столбца, один из которых – тестовый балл за выполнение анализируемого тестового задания ( $X$ ), другой – общий тестовый балл каждого испытуемого ( $Y$ ),  $N$  – количество испытуемых. Между значениями этих двух векторов и устанавливается мера связи.

Расчет коэффициента корреляции осуществляется в четыре этапа.

*Первый этап.* В процессе его реализации находится сумма квадратов отклонений баллов испытуемых от среднего арифметического балла в  $j$ -м задании ( $SS_x$ ) по следующей зависимости:

$$SS_x = \sum X_j^2 - (\sum X_j)^2 / N. \quad (9)$$

*Второй этап.* В процессе его реализации находится сумма квадратов отклонений тестовых баллов испытуемых от среднего арифметического балла по  $k$ -му тесту ( $SS_y$ ) по следующей зависимости:

$$SS_y = \sum Y^2 - (\sum Y)^2 / N. \quad (10)$$

*Третий этап.* В процессе его реализации находится скорректированная на средние значения сумма попарных произведений  $X_j$  и  $Y_k$  по формуле

$$SP_{xy} = \sum X_j Y - \sum X_j \times \sum Y / N, \quad (11)$$

где  $\sum X_j Y$  – сумма произведений баллов каждого испытуемого по  $j$ -му заданию и по  $k$ -му тесту в целом;  
 $\sum X_j \times \sum Y / N$  – коррекция на средние значения  $X_j$  и  $Y_k$ .

*Четвертый этап.* В процессе его реализации рассчитывается коэффициент корреляции по формуле

$$r_{xy} = SP_{xy} / \sqrt{SS_x \times SS_y}. \quad (12)$$

В том случае, если коэффициент корреляции между баллами по анализируемому тестовому заданию и баллами по всему тесту находится в интервале от 0,1 до 0,85, тестовое задание может быть использовано при формировании теста.

*Дифференцирующая способность.* Она определяет корректность формулировки вопросов тестовых заданий и выражается индексом дифференциации «*Id*» [2]. С ее помощью можно получить информацию о корректности вопросов конкретного тестового задания с целью их дальнейшего качественного улучшения.

Для определения дифференцирующей способности тестовых заданий курсантов учебной группы следует разделить на две одинаковые по численности подгруппы: сильную и слабую. В каждой подгруппе необходимо провести контрольное тестирование и по его результатам определить индекс дифференциации тестовых заданий по следующей зависимости:

$$Id = (R_1 - R_2) / N, \quad (13)$$

где  $R_1$  – количество правильных ответов в сильной подгруппе;  
 $R_2$  – количество правильных ответов в слабой подгруппе;  
 $N$  – число тестируемых курсантов в подгруппе.

Индекс дифференциации может изменяться от -1 (все курсанты из сильной подгруппы ответили неправильно, а из слабой, напротив, – правильно) до +1 (все курсанты из сильной подгруппы и все из слабой ответили правильно).

Индекс дифференциации показывает степень, с которой то или иное задание позволяет различать положительные достижения курсантов в освоении проверяемого учебного материала. По мнению авторов, дифференцирующая способность вопроса тестового задания может считаться допустимой, если значение его индекса дифференциации не ниже +0,4. Меньшее значение индекса дифференциации говорит о том, что формулировка данного вопроса не позволяет различать курсантов по уровню их теоретической подготовки, и вопрос должен быть откорректирован. Если индекс дифференциации отрицателен, то это свидетельствует о том, что слабые курсанты отвечают на данный вопрос лучше, чем сильные, поэтому вопрос тестового задания поставлен некорректно и его следует заменить другим. Корректировка вопросов тестовых заданий осуществляется для того, чтобы обеспечить им примерно равную дифференцирующую способность.

Созданная авторами методика разработки тестовых оценочных средств для определения сформированности профессиональных компетенций курсантов высших военно-учебных заведений аккумулирует в себе передовые достижения в области педагогического тестирования, изложенные в работах [1, 2, 3, 4, 6, 8, 11 и др.]. Она отличается от существующих методик разработки тестовых оценочных средств тем, что в ее основу заложен анализ содержательной значимости структурных элементов рабочих программ для формирования профессиональных компетенций курсантов. Это позволяет при разработке тестовых заданий и тестов в целом учитывать требования компетентного подхода к результатам обучения и,

как следствие, повысить результативность проведения оценочных работ. Данный подход может быть использован для разработки тестовых оценочных средств в высших учебных заведениях гражданских вузов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Апробация разработанной методики была проведена на кафедре картографии Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского на примере создания тестовых оценочных средств для определения сформированности профессиональных компетенций у курсантов при изучении дисциплины «Геоинформационное картографирование». Работа началась с расчета численности экспертной группы, необходимой для экспертизы разрабатываемых тестовых оценочных средств.

Расчет численности экспертной группы осуществлялся согласно зависимости (1).

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры:  $d_{\max} = 100\%$ ;  $d_{\min} = 70\%$ ;  $\Delta g = 10\%$ ;  $\gamma = 0,95$ ;  $\varphi = 0,04$ ;  $d = 100\% - 70\% = 30\%$ , т.е.

$$N_0 = 0,04 \times 30^2 / 10^2 \times (1 - 0,95) = 36 / 5 = 7,2.$$

Исходя из расчетов, численность экспертной группы должна составлять семь человек.

В качестве кандидатов в экспертную группу было включено десять ведущих преподавателей кафедры картографии.

Для реализации процедуры самооценки была разработана анкета в виде табл. 3.

Таблица 3

### Анкета самооценки компетентности кандидатов в эксперты

№№ п/п	Наименование показателя	Возможные альтернативы ответов и их балльные оценки			
		2,0	4,0	7,0	10,0
1	Стаж педагогической работы, лет	1–5	6–10	11–15	Более 15
2	Занимаемая должность	Преподаватель	Старший преподаватель	Доцент, заместитель начальника кафедры	Профессор, начальник кафедры
3	Наличие печатных работ по оценке качества профессиональной подготовки	Тезисы докладов	Научные отчеты	Научные статьи в журналах, не входящих в перечень ВАК	Научные статьи в журналах, входящих в перечень ВАК
4	Источники информации, используемые для оценки качества профессиональной подготовки	Собственные интуитивные представления	Обобщения работ отечественных авторов	Обобщения работ зарубежных авторов	Результаты собственных исследований
5	Ключевые слова, характеризующие компетентностный подход к оценке качества профессиональной подготовки	1–4	5–8	9–12	Более 12
6	Фамилии ведущих ученых, занимающихся оценкой качества профессиональной подготовки на основе компетентностного подхода	1–2	3–5	6–10	Более 10

Определение интегрального показателя компетентности кандидатов в эксперты осуществлялось согласно зависимости (3), его результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Матрица интегрального показателя компетентности  
кандидатов в эксперты**

Оцениваемые кандидаты в эксперты	Показатели		Значение интегрального показателя
	взаимной оценки	самооценки	
	Вес показателя		
	0,60	0,40	
1	8,3	8,8	8,5
2	6,7	5,1	6,1
3	8,5	9,3	8,8
4	8,1	5,2	6,9
5	6,6	5,2	6,0
6	5,3	3,2	4,5
7	6,6	5,1	6,0
8	7,5	3,9	6,1
9	5,2	2,5	4,1
10	4,6	2,0	3,6

Исходя из полученных результатов, в экспертную группу по разработке тестовых заданий для мониторинга сформированности профессиональных компетенций курсантов вошли кандидаты в эксперты под номерами 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 8.

В соответствии с матрицей компетенций специальности 05.05.02 «Военная картография» (специализация «Геоинформационная картография») в состав профессиональных компетенций, формируемых в рамках дисциплины «Геоинформационное картографирование», входят две компетенции: 1) способен применять геоинформационные системы военного назначения (ГИС ВН) для анализа и обработки геопространственной информации; 2) способен создавать с использованием ГИС ВН цифровые (электронные) топографические и специальные карты. В качестве примера в табл. 5 приведен фрагмент результатов оценки содержательной значимости структурных элементов дисциплины «Геоинформационное картографирование» для первой компетенции.

Согласно данным, приведенным в табл. 5 (фрагмент), по три тестовых задания должны быть разработаны для учебных вопросов 3, 9 и 80, а по пять тестовых заданий – для учебных вопросов 4, 5, 8 и 79.

Для оценки сформированности анализируемой профессиональной компетенции всего было разработано 165 тестовых заданий, входящих в пять тестов. Каждый тест включал в себя от 28 до 40 тестовых заданий. При этом сложность тестовых заданий зависела от значения нормированного коэффициента учебного вопроса (чем больше коэффициент, тем сложнее задание).

Диагностическая способность тестовых заданий определялась путем расчета коэффициентов корреляции между баллами по тестовому заданию и баллами по всему тесту. Для примера приведем результаты расчета коэффициента корреляции для пятого тестового задания первого теста (табл. 6), где  $X_5$  – тестовый балл за выполнение пятого тестового задания,  $Y_1$  – суммарный тестовый балл за выполнение первого теста.

*Первый этап.* Нахождение суммы квадратов отклонений баллов испытуемых от среднего арифметического балла в анализируемом задании ( $SS_x$ ):

$$SS_x = \sum X_5^2 - (\sum X_5)^2 / N = 5 - 5^2 / 10 = 2,50$$



Таблица 5

**Фрагмент результатов оценки содержательной значимости структурных элементов дисциплины «Геоинформационное картографирование»**

Код учебного элемента	Наименование учебного элемента	Ненормированный коэффициент			Нормированный коэффициент
		Разделы	Темы	Вопросы	
P1	Введение в геоинформационное картографирование	26,7			
T1	Сущность дисциплины «Геоинформационное картографирование»		45,0		
B1	Сущность и задачи геоинформационного картографирования			28,3	8,16
B2	Ключевые понятия геоинформационного картографирования			33,3	9,60
B3	Преимущества цифровых (электронных) карт местности и ГИС перед традиционными средствами картографического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации			38,4	<b>11,07</b>
T2	Аналого-цифровое преобразование пространственных данных при создании цифровых (электронных) карт		55,0		
B4	Сущность понятия модель пространственных данных и ее составные части			14,0	<b>18,09</b>
B5	Растровая модель пространственных данных			12,1	<b>15,64</b>
B6	Регулярно-ячеистая модель пространственных данных			5,1	6,59
B7	Квадратомическая модель пространственных данных			4,1	5,30
B8	Векторная модель пространственных данных			13,1	<b>16,93</b>
B9	Сущность процесса аналого-цифрового преобразования пространственных данных в растровые форматы			10,1	<b>13,05</b>
....	.....	.....	.....	.....	.....
B79	Пространственный анализ и тематическое картографирование			10,8	<b>15,54</b>
B80	Построение «дерева свойств» для оценки проходимости местности боевой техникой вне дорог			7,7	<b>11,08</b>
B81	Определение коэффициентов весомости для всех показателей, участвующих в оценке			4,5	6,47
B82	Создание средствами ГИС «Карта 2011» и ГИС «MapInfo» электронных аналитических (факторных) карт для каждого показателя			6,9	9,93
B83	Деление изучаемой территории на расчетные участки, определение для каждого из них синтетического показателя проходимости местности и создание электронной синтетической карты			3,7	5,32
B84	Оформление и сдача практической работы. Исправление замечаний			2,7	3,88

*Второй этап.* Нахождение суммы квадратов отклонений тестовых баллов испытуемых от среднего арифметического балла по всему тесту ( $SS_y$ ):

$$SS_y = \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2 / N = 5513 - 52441/10 = 268,90.$$

*Третий этап.* Нахождение скорректированной на средние значения суммы попарных произведений  $X_5$  и  $Y_I$ :

$$SP_{xy} = \sum X_5 Y_I - \sum X_5 \times \sum Y_I / N = 134 - 5 \times 229 / 10 = 19,50.$$

*Четвертый этап.* Расчет коэффициента корреляции:

$$r_{xy} = SP_{xy} / \sqrt{SS_x \times SS_y} = 19,50 / \sqrt{2,50 \times 268,90} = 0,752.$$

Согласно полученным результатам коэффициент корреляции между баллами по анализируемому тестовому заданию и баллами по всему тесту равен 0,75. Следовательно, данное тестовое задание может быть использовано при формировании теста, так как значение коэффициента корреляции находится в интервале от 0,1 до 0,85.

Таблица 6

### Исходные данные для расчета коэффициента корреляции

Испытуемые	Исходные данные для расчета коэффициента корреляции				
	$X_5$	$Y_I$	$X_5 Y_I$	$X_5^2$	$Y_I^2$
1	1	29	29	1	841
2	1	28	28	1	784
3	1	27	27	1	729
4	0	16	0	0	256
5	0	16	0	0	256
6	1	25	25	1	625
7	1	25	25	1	625
8	0	25	0	0	625
9	0	14	0	0	196
10	0	24	0	0	576
$\Sigma$	5	229	134	5	5513

Дифференцирующая способность тестовых заданий определялась с использованием зависимости (13) и составила для первого теста +0,52; для второго теста +0,48; для третьего теста +0,61; для четвертого теста +0,55 и для пятого теста +0,44. Полученные результаты свидетельствуют о том, что формулировка вопросов тестовых заданий курсантам понятна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная авторами методика позволяет разрабатывать тестовые задания для оценки сформированности профессиональных компетенций курсантов. Ее работоспособность была апробирована на примере дисциплины «Геоинформационное картографирование». В процессе апробации были получены положительные результаты, которые позволили сформировать фонд оценочных средств по данной дисциплине.

Основными направлениями дальнейших исследований являются: разработка тестовых заданий для других дисциплин профессионального цикла специализации «Геоинформационная картография», наполнение фондов оценочных средств этих дисциплин тестовыми заданиями, распределение тестовых заданий по уровням трудности, повышение надежности, валидности и аутентичности разрабатываемых тестовых заданий.

### Список используемых источников

1. *Аванесов В.С.* Вопросы методологии педагогических измерений // Педагогические измерения. – 2005. – №1. – С. 3–27.
2. *Аванесов В.С.* Проблема эффективности педагогических измерений // Педагогические измерения. – 2008. – №4. – С. 3–24.
3. *Азгальдов Г.Г.* Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). – М.: Экономика, 1982. – 256 с.
4. *Алещанова И.В., Фролова Н.А.* Педагогическое тестирование как средство повышения качества контроля и оценки эффективности учебного процесса в вузе // Современные проблемы науки и образования. – 2007. – № 6–3. – С. 13–17.
5. *Гарафутдинова Г.Р., Упишинская А.Е.* Модель оценивания профессиональных компетенций // Инновации в образовании. – 2011. – №4. – С. 15–25.
6. *Мишин И.Н.* Эффективность использования тестов в оценке уровня освоения компетенций // Приоритетные направления развития науки и образования: материалы XI Международной научно-практич. конф. (Чебоксары, 27 ноября 2016 г.) – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – № 4 (11). – С. 203–207.
7. *Нохрина Н.Н.* Система тестового контроля // Высшее образование в России. – 2002. – № 1. – С. 106–107.
8. *Овсянников И.В.* Формирование профессиональных компетенций у курсантов военных командных вузов: автореф. дис. канд. пед. наук. – М., 2011. – 20 с.
9. *Осипов Г.К.* Системное проектирование профессиональной подготовки выпускников высших военно-учебных заведений на основе компетентностного подхода как условие повышения качества подготовки военных кадров / Г.К. Осипов, И.Ю. Воронков, В.В. Хиленко, М.А. Голубев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2014. – Вып. 642. – С. 185–191.
10. *Осипов Г.К., Воронков И.Ю., Хиленко В.В.* Пути совершенствования подготовки военных картографов в современных условиях // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 640. – С. 261–264.
11. *Осипов Г.К., Хиленко В.В.* Научно-методические основы мониторинга формирования профессиональных компетенций у курсантов высших военно-учебных заведений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2016. – Вып. 652. – С. 215–226.
12. *Сафонцев С.А., Левченко А.А.* Стандартизация образовательных систем: монография. – Ростов н/Д.: Изд-во РО ИПК и ПРО, 2008. – 96 с.
13. *Сафонцев С.А.* Образовательная квалиметрия в системе повышения квалификации. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост.ун-та, 2003. – 149 с.

А.В. Стешов,  
кандидат военных наук, доцент

## МЕТАМОДЕЛЬ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ РЕЧЕВОЙ КОММУНИКАЦИИ

В публикации обосновывается графическая метамоделю педагогической речевой коммуникации, раскрывается структура и содержание коммуникативной компетентности преподавателя высшей школы.

Ключевые слова: метамоделю, речевая коммуникация, риторический аспект, коммуникативная компетентность.

Проблема коммуникативной компетентности научно-педагогических работников актуализировалась в связи с переходом к новой парадигме субъект-субъектных отношений участников образовательного процесса. Решение этой проблемы напрямую связано с риторикой, идеи которой получают развитие в современных теориях речевой коммуникации. Авторы книги «Педагогическая риторика» (под ред. Н.А. Ипполитовой) полагают: «Педагогическая риторика – разновидность частной риторики, которая обеспечивает решение проблемы формирования коммуникативной компетентности будущего учителя, так как позволяет конкретизировать основные положения общей риторики, продемонстрировать специфику применения правил риторики в реальной речевой практике, определить теоретический и практический аспекты овладения профессиональной речью» [1]. Для осуществления этой идеи, как минимум, необходима продуктивная модель педагогической речевой коммуникации. Без этого проблему не решить.

В Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского подобная проблема будущих преподавателей (в том числе адъюнктов) и действующих научно-педагогических работников решается преподаванием академической (в прошлом университетской) риторики. К сожалению, ценный опыт педагогической коммуникации выдающихся университетских профессоров России конца XIX века, когда процветала университетская риторика, почти не изучен. До настоящего времени нет публикаций методологических основ общей риторики. В современных учебниках и пособиях нет даже упоминаний о методе риторики. Опыт обучения учителей педагогической риторике носит «кустарный характер». Методические разработки и модели в этой области риторической педагогики (по американской терминологии) – редкое событие. В их число входят некоторые теоретические и методические работы автора [3–8], позволяющие осуществить системное моделирование совместной речевой деятельности преподавателя и обучающегося.

Цель настоящей публикации – обосновать метамоделю педагогической речевой коммуникации и с ее помощью показать и объяснить роль риторического аспекта в формировании коммуникативной компетентности преподавателя высшей школы (по сути, «коктейля навыков и способностей», как было сказано в докладе Юнеско о понятии компетентность). Здесь мы заменяем метафору «коктейль» на триединый «пакет» (риторических, перцептивных и интерактивных) способностей, именуемый в некоторых публикациях [10] как модель и чаще как паспорт коммуникативной компетентности.

Автор термина Джекобсон (Jacobson, 1986) описывал метамоделю как «замечательный набор правил для управления мышлением». «Используя метамоделю для управления своим мышлением, вы установите последовательность, упорядочите и структурируете свои ментальные репрезентации более продуктивным образом», – пишет классик высшей практической психологии Майкл Холл [2].

Метамоделю в теории речевой деятельности – это текстовое описание порядка управляемой мыслительно-речевой деятельности коммуниканта на высоком уровне абстрагирования

и обобщения. В этой теории под обобщениями понимаются лингвистические структуры: высказывания, языковые формулы, мантры, парадигмы. Автор распространил этот термин на графическое представление парадигмы («более продуктивного образа») речевой коммуникации и с высоты предельного уровня абстрагирования провел диагностирование «нарушений правильной формулировки» высказываний в имеющихся вербальных моделях коммуникации, таких как: упущения, неопределенности, неточности, нечеткости, искажения смыслов. Проведено такое же диагностирование имеющихся графических моделей коммуникации. Системный «набор правил для управления мышлением» в педагогической речевой коммуникации в графическом исполнении автор именовал специальным психолингвистическим термином метамодель.

В теориях коммуникации встречаются графические модели в форме одной или двух стрелок (рис. 1, 2, 3). Это примеры чрезмерного обобщения, как самые бедные по смыслу знаки. Мы стремимся создать метамодель, которая бы раскрывала формулу коммуникации  $X=U$  (в которой  $X$  обозначает «внешнее поведение» говорящего, а  $U$  – «внутреннее состояние и значение» для слушающего [2]), объясняла известные в науке каноны умственной и речевой деятельности коммуникантов, позволяла разобраться с содержанием понятия коммуникативной компетентности.

В процессе педагогической речевой коммуникации передача учебной информации осуществляется говорением (речью) и другими невербальными способами и приемами воздействия на сознание и чувства обучающихся. Вся эта управляющая мыслеречевая деятельность педагога регламентируется методом риторики монолога. Если преподаватель не владеет канонами и инструментом этого метода, то как же у него могут появиться риторические умения и способы убеждения, приемы аргументации и риторический стиль речи?

Результативность педагогической коммуникации в учебном монологе прежде всего зависит от риторических способностей преподавателя. Речью он осуществляет изложение информации, одновременно управляет речемыслительной деятельностью обучающихся и речью координирует свои взаимодействия со слушателями. Такой характер речевой коммуникации типичен для педагогической деятельности. Здесь главная функция лектора – передача мыслей в убеждающем монологе, на втором месте – управление восприятием и усвоением информации слушателями и на третьем месте – межличностное взаимодействие со всеми актами, контактами, стимулами и реакциями. Как видим, педагогическая речевая коммуникация не может рассматриваться только как социально-психологическое взаимодействие коммуникантов. Например, при дистанционном обучении, в одноразовой актовой речи или научном докладе ученого третий аспект, межличностное взаимодействие, имеет минимальное значение для успеха выступления. В собеседовании, на консультации, при защите проекта роль третьего аспекта коммуникации возрастает.

Какими моделями речевой коммуникации мы располагаем к настоящему времени? Есть теория и модель коммуникации Г. Лассвелла, математическая модель Шеннона – Уивера, модель Д. Гербнера, социально-психологическая модель Т. Ньюкомба, интегральная (обобщенная) модель Б. Вестли и М. Маклина, семиотическая модель коммуникации Ч. Пирса. Описание этих моделей изложено в работе Д.П. Гавра [12]. Из отечественных работ – модель обучения

Е.А. Солодовой [13] и трансакционная модель общения М.С. Каган [14].

Теории и модели названных авторов не позволяют объяснить соотношение трех аспектов речевой коммуникации: риторического, перцептивного и интерактивного в деятельности преподавателя. В моделях они не представлены. В графах имеющихся моделей невозможно разместить научно обоснованные каноны (порядки и алгоритмы) деятельности коммуникантов. Модели не позволяют вывести совокупность интегративных знаний, умений, способов, приемов, действий и реакций, на базе которых формируются многочисленные коммуникативные способности. Необходима особая синергетическая с большим уровнем обобщения метамодель речевого взаимодействия преподавателя и обучающегося, максимально соответ-

ствующая реальному социально-психологическому процессу общения людей. Она должна быть простой и понятной любому преподавателю.

Почему имеющиеся в опубликованных работах графические модели не подходят для объяснения всех аспектов педагогической речевой коммуникации? Во-первых, они разрабатывались не для изучения речевой деятельности в учебном процессе. Во-вторых, познавательные возможности чрезмерно абстрактных символических моделей ограничены. Они не вызывают ассоциаций реального педагогического общения и не доступны для понимания без ознакомления с соответствующей теорией. В-третьих, степень подобия моделей реальным системам-процессам педагогической речевой коммуникации крайне мала. Во взаимодействии есть процессы говорения, слушания и множество различных социальных, умственных, психических и других коммуникативных актов, но они никак не обозначены на моделях терминами или знаками.

В-четвертых, модели не показывают динамики коммуникативной деятельности (фаз, канон, шагов, порядков) и связей понятий, которыми описывается процесс взаимодействия людей.

В-пятых, имеющиеся варианты не отвечают требованиям к модели мышления [15], а этот феномен пронизывает все три аспекта педагогической речевой коммуникации.

В опубликованных теориях коммуникации не приводятся какие-либо ограничения, требования и цели создания графических моделей. Изображены знаковые структуры, которые не позволяют объяснить уже выявленные и сформулированные законы речевой коммуникации, а ведь закон – это исчерпывающее знание. Эвристические возможности графических схем не заявлены. Они не поддаются модификации для объяснения различных форм коммуникации без нарушения базовой (системной) конфигурации.

Судя по стрелочным моделям, образ коммуникации в эволюции познания представлялся в трех вариантах. Стрелка-модель коммуникации как акции обозначала информационную одностороннюю связь субъекта с тем или иным объектом – человеком, аудиторией, животным, машиной. Первые теории и модификации моделей расширяли и детализировали эту парадигму (рис. 1).



Рис. 1. Представление об односторонней речевой коммуникации

Смысл первой парадигмы выражается в том, что субъект передает некую информацию (знания, идеи, деловые сообщения, фактические сведения, сигналы и т.п.), которую получатель должен всего-навсего принять, понять (правильно декодировать), хорошо усвоить и в соответствии с этим поступать. Получатель в подобных случаях является объектом воздействия, ибо отправитель, например лектор, смотрит на обучающегося как на пассивный «приёмник», хорошо настроенный, точно и надежно работающий. В таких субъект-объектных отношениях активность «приёмника» направлена либо на повышение «коэффициента полезного действия» своего способа усвоения информации, либо на блокирование восприятия (проявления реакции недовольства, возражений, перебиваний и т.п.). Здесь объект не имеет возможности повлиять на замысел речи говорящего, высказать свое или другое понимание и в конце концов смиряется с ролью пассивного «приёмника» монологической речи. В случае реплик со стороны слушателя отправитель воспринимает реакции обратной связи как угрозы своему замыслу и не позволяет обучающимся продолжить нежелательный диалог. Университетский (академический) учебный монолог (лекция) относится к первому типу коммуни-

кации и осуществляется способами и средствами классической риторики, к сожалению, забытой и мало кому из преподавателей высшей военной школы известной.

Радикально иной смысл заложен в следующей парадигме взаимонаправленной коммуникации, когда преподаватель в диалогических формах занятий видит перед собой не объект информационного воздействия, а заинтересованного партнера, который индивидуально своеобразен, активен в силу своих намерений и предпочтений, обладает другой стратегией мышления, развитой способностью анализировать и перерабатывать информацию. Это слушатель-собеседник, сотрудник-оппонент, ученый-профессионал, опытный специалист, стремящийся к выработке новой информации и взаимопониманию. В такой коммуникации оба субъекта являются взаимозависимыми соучастниками общего процесса решения познавательной задачи. Второе субъект-субъектное представление о речевой коммуникации привело к появлению понятия интеракция (рис. 2).

### Коммуникация как интеракция



### Метод передачи-рефлексии знаний и опыта

**Интеракция** – встречные потоки информации, в которых смыслы порождаются, выражаются и воспринимаются коммуникантами в процессе чередования ролей говорящего и слушающего



Рис. 2. Представление о взаимонаправленной речевой коммуникации

В последнее время исследуется многонаправленная трансактная коммуникация. В этой парадигме высказывание адресуется нескольким партнерам, и поскольку они равно активны, информация последовательно прирастает с каждым коммуникативным актом, обогащается, расширяется в процессе циркуляции. Социально-психологические отношения людей в этой коммуникации уравновешены. Здесь нет длительных монологов в интересах своих позиций, нет доминирования одного суждения. Здесь непрерывное сопоставление точек зрения, совместный поиск некой общей позиции в синтезе нескольких, не исключено далеких на первый взгляд мнений. К такой коммуникации относятся круглый стол, мозговой штурм, групповое занятие, кейс-метод, ролевая игра и др., то есть многогласие в познании с равными правами и возможностями для всех участников прийти к взаимопониманию. Представление о такой речевой коммуникации дает рис. 3.

### Коммуникация как трансакция



### Метод совместного получения новых знаний и опыта



**Трансакция** – совместное координирование социальных отношений – актов и реакций (взаимодействий) для достижения взаимопонимания.

Рис. 3. Представление о многонаправленной речевой коммуникации

Нас интересует синергетическая (многомерная, междисциплинарная, легко трансформируемая) модель речевой коммуникации, которая бы охватывала все три смысла в одной структуре, в одной парадигме. Такое обобщение позволяет выйти на более высокий горизонт познания триединого феномена и приближает к созданию универсальной метамодели речевой коммуникации.

Почему метамодель речевой коммуникации должна состоять из трех структур? По мнению известного социального психолога Г.М. Андреевой, «процесс общения включает три содержательных аспекта: коммуникативный, перцептивный и интерактивный» [16]. Из-за

длительного отсутствия риторики в нашей системе образования риторический аспект замещался коммуникативным, но должного осмысления так и не достиг.

Для изображения универсальной парадигмы (сложившегося у нас понимания процесса речевой коммуникации) мы расположили знаки (стрелки) и символы («крылья») двух аспектов – риторического и перцептивного – по сторонам графа коммуникативного треугольника социально-психологической модели Т. Ньюкомба. Левое «крыло» символизирует метод риторики монолога, правое – метод риторики слушания (встречается такое именование речемыслительной деятельности слушающего). Коммуникативный треугольник символизирует интерактивный аспект. Трехчастная парадигма многонаправленной речевой коммуникации объединила четыре знака и три символа в простую и понятную структуру (рис. 4).

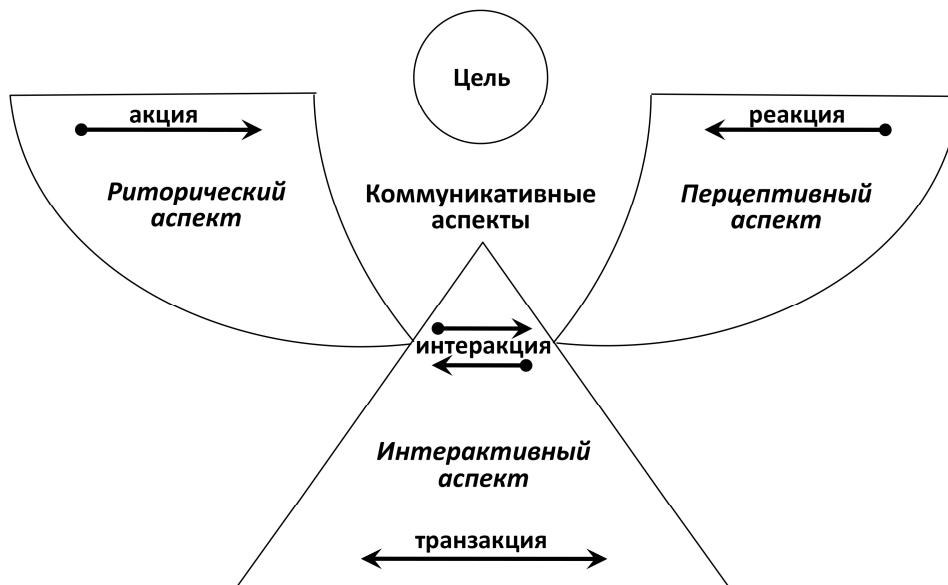


Рис. 4. Парадигма речевой коммуникации

Автор убежденно считает изображенную парадигму синергетическим продуктом, потому что этот образ можно развернуть в универсальную адаптивную метамодель процесса речевой коммуникации, трансформировать в другие модификации, расширять смысловое поле в трех направлениях, не нарушая системной конфигурации. Нетрудно представить динамику движения коммуникантов вверх по сторонам треугольника (по ступенькам или по спирали) от основания, когда позиции сторон далеко отстоят друг от друга и от вершины, где достигается цель коммуникации. Крылья, символизирующие речевую деятельность коммуникантов, могут располагаться на разных уровнях, демонстрируя расхождения позиций и удаление их от цели коммуникации. Структура парадигмы ассоциируется с неким летающим существом, а крылья, как известно, символизируют процесс мышления человека.

Одной из трансформаций данной парадигмы является модель метода дискуссии, которая позволяет в своем контуре разместить в строгом порядке двадцать законов мышления [7], и тем самым доказать, что у риторики и диалектики метод один [4].

В контуре риторического аспекта естественно занял место канон метода риторики монолога, в контуре перцептивного аспекта разместился канон метода слушания, восприятия и усвоения информации, и в контур коммуникативного аспекта вписался канон метода социального взаимодействия людей в общении. Теперь можно сказать: метамодель представляет триединый метод речевой коммуникации. Смыслы линий поясним словами, обозначающими различную деятельность говорящего и слушающего. Метамодель речевой коммуникации (рис. 5) расшифровывает универсальную парадигму, гармонична и удобна для масштабного расширения смысла.



Основу терминосистемы метамодели составляет совокупность всех слов и терминов, которую можно расширять и детализировать по мере необходимости для объяснения любого метода, этапа, канона или акта в деятельности коммуникантов.

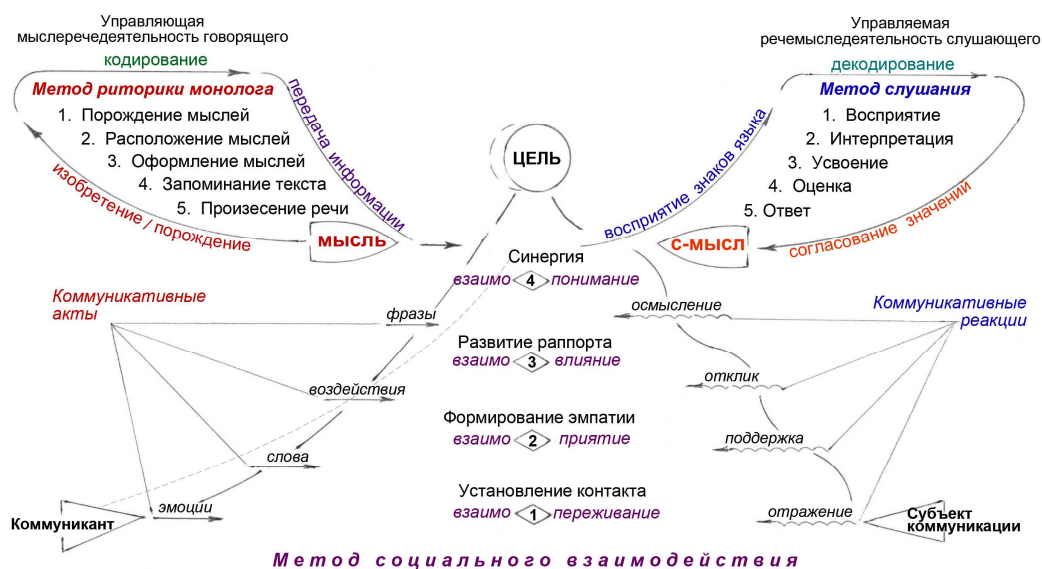


Рис. 5. Метамодель речевой коммуникации

Например, для осмысления риторического канона, соответствующего методу риторики монолога, достаточно увеличить масштаб символа (левого крыла) и разместить под названием каждого этапа конкретные умения. Такая детализация позволит понять всю систему управляющей мыслеречедеятельности и сформулировать пакет риторических способностей. Эта система интегративных знаний, умений и способностей опубликована в статье [9] и реализована в учебном пособии [8]. Подобным путем можно детализировать два других аспекта речевой коммуникации, раскрыть инструмент их методов и обосновать системы знаний и умений для формирования соответствующих перцептивных и интерактивных способностей.

Как создавалась уже отработанная методика формирования риторических способностей лектора? Риторический канон на основе анализа теорий инвенции (риторического изобретения) детализировался до подробного описания мыслеречедеятельности лектора. Естественно, терминосистема левой части метамодели значительно увеличилась за счет понятий логики, лингвистики, психологии, теории аргументации и других дисциплин, и мы получили матрицу методики риторической разработки монологической речи (рис. 6). Банк всех понятий на матрице составляет объем необходимых интегративных знаний, которыми должен овладеть обучающийся, чтобы приступить к отработке совокупности обязательных риторических умений. Только после этого можно переходить к формированию сложных способностей на индивидуальных тренингах, диалогах, конкурсах ораторов.

Матрица методики – это инструмент метода классической риторики монолога. Она позволяет отсечь всё второстепенное и сосредоточить усилия на риторических способностях, соответствующих риторическому канону. На основе матрицы обоснована методика [9] и система знаний, умений, упражнений и заданий, составляющих содержание учебных пособий [7, 8], обеспечивающих формирование коммуникативных способностей будущих лекторов высшей военной школы.

Некоторые формулировки коммуникативных способностей преподавателя, доцента, профессора приведены в профессиональном стандарте «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования», утвержденном Приказом Минтруда России №608н от 08.09.2015.

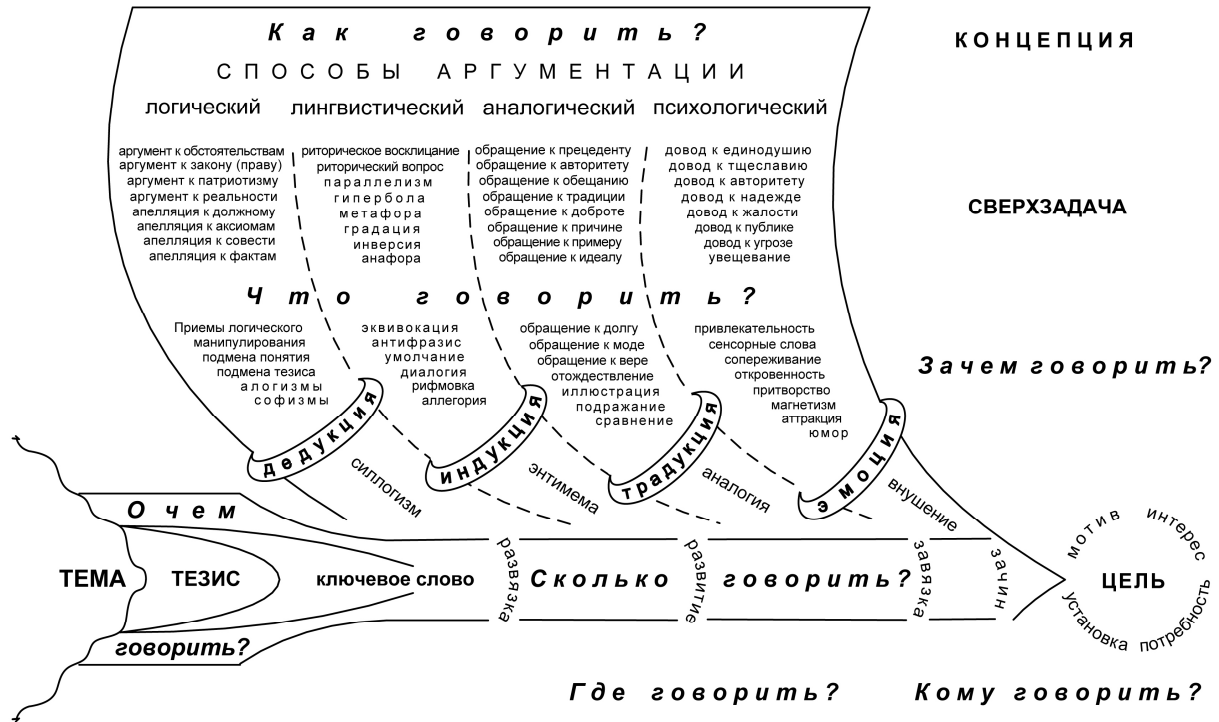


Рис. 6. Матрица методики риторической разработки монологической речи

Метамодель позволила составить базовый пакет формулировок коммуникативных способностей педагогического работника высшей школы. Этот базовый набор формулировок способностей можно дифференцировать по должностям преподавателя, доцента, профессора, дробить на уровни, не нарушая стройную систему необходимых личностных качеств вузовского оратора, и разрабатывать рекомендации по оцениванию лекторского (педагогического) мастерства различных категорий педагогических работников. Так, например, формировался паспорт коммуникативной компетентности профессора высшей школы (рис. 7), владеющего академической риторикой и основами теории речевой коммуникации.



Рис. 7. Паспорт коммуникативной компетентности профессора высшей школы

Универсальная метамодел речевой коммуникации позволяет планировать содержание учебных дисциплин, курсов, модулей по наращиванию коммуникативной компетентности обучающихся на курсах повышения квалификации. Метамодел легко трансформируется в модификации для диалога, дискуссии, переговоров, спора и других форм коммуникации, усложняется, детализируется описывающими то или иное действие коммуникантов понятиями теорий. Можно подбирать необходимый объем знаний и умений по трем аспектам речевой коммуникации в зависимости от занимаемой должности работника, функций речедеятеля: преподаватель, юрист, переговорщик, воспитатель, депутат и др. В этой универсальности практическая ценность метамодел.

Предлагаемый подход к моделированию позволяет создавать педагогическую систему наращивания коммуникативных способностей от низкого (репродуктивного) уровня деятельности к высокому (интегративному) по мере карьерного роста педагогического работника. Система формирования риторической компетентности будущих преподавателей высшей военной школы первого (репродуктивного) уровня складывалась в течении 37 лет создания теории академической риторики в Военно-морской академии имени Н.Г. Кузнецова и в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского и опубликована в работах автора [3, 8].

### Список используемых источников

1. Педагогическая риторика / под ред. Н.А. Ипполитовой. – М.: Прометей, 2001. – 340 с.
2. Холл М. Магия коммуникации. Использование структуры и значения языка. – СПб.: Прайм-Еврознак, 2004. – 350 с.
3. Стешов А.В. Ораторское искусство высшей военной школы: анализ риторической педагогики. – Л.: Военно-морская академия имени Н.Г. Кузнецова, 1990. – 295 с.
4. Стешов А.В. Парадигма и метод риторики // Риторика в системе коммуникативных дисциплин: записки Горного института. – 2005. – Т. 160 (1).
5. Стешов А.В. Риторическая педагогика как фактор устойчивого развития профессионального мастерства преподавателя // Образование через всю жизнь: непрерывное образование для устойчивого развития. – 2007. – Т. 5. – С. 363–365.
6. Стешов А.В. Методика преподавания риторики с помощью интеллект-карт // Мир русского слова. – 2010. – №1. – С. 78–85.
7. Стешов А.В. Учебная дискуссия: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 159 с.
8. Стешов А.В. Риторическая компетентность вузовского преподавателя: учеб. пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 117 с.
9. Стешов А.В., Стешова М.А. Методика риторической разработки публичной речи // Вестник Санкт-Петербургской юридической академии. – 2013. – №2 (19). – С. 98–106.
10. Межличностная коммуникация: теория и жизнь / О.И. Матяш, В.М. Погольша, Ж.В. Зарицкая и др. – СПб.: Речь, 2011. – 560 с.
11. Советский энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1980. – 1600 с.
12. Гавра Д.П. Основы теории коммуникации: учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2011. – 288 с.
13. Солодова Е.А. Новые модели в системе образования: Синергетический подход: учеб. пособие. – М.: Либроком, 2013. – 344 с.
14. Каган М.С. Мир общения: проблема межсубъектных отношений. – М: Политиздат, 1988. – 319 с.
15. Кочергин А.Н. Моделирование мышления. – М.: Политиздат, 1969. – 224 с.
16. Андреева Г.М. Социальная психология. – М.: Аспект-Пресс, 2001. – 384 с.

О.В. Гугорвич,  
кандидат философских наук

## ПРОБЛЕМА «ЧЕЛОВЕК В НАУКЕ». ЧЕЛОВЕК НАУКИ

*С.П. Королёву посвящается*

В публикации автор обращается к проблеме «человек в науке», показывает, как в ходе развития наукоедения менялось отношение к роли ученого-творца в науке, объясняет обусловленность разных подходов к данной проблеме динамикой самой науки. Большое внимание в работе уделяется факторам и условиям, способствующим формированию творческой личности, что не является случайностью, так как эта тема всегда была сопутствующей и обсуждалась в философии параллельно с проблемой «человек в науке». Представленная автором фактологическая история академика С.П. Королёва призвана показать, насколько существенную роль в истории науки играет личность конкретного человека.

Ключевые слова: наука, ученый-творец, научное творчество, научное сообщество, космос, прикладная космонавтика.

Современное общество трудно представить без науки. Ее роль с каждым днем возрастает. Превратившись в непосредственную производительную силу, она коренным образом меняет уклад нашей жизни. В этой связи исследование, затрагивающее проблему «человек в науке», является, безусловно, *актуальным* на сегодняшний день.

Чтобы понять специфику науки, философы рассматривают ее с разных сторон, изучая как систему знаний, особую деятельность человека, социальный институт, фактор общественного прогресса, наконец, как форму общественного сознания. *Нас же интересует*, как динамика развития самой науки меняла представление о месте человека в науке. В рамках авторской позиции по данной проблеме стоит задача раскрыть факторы и условия, влияющие на творческую деятельность человека, а также продемонстрировать роль человека в науке на примере судьбы академика С.П. Королёва.

*Две основные идеи* хотелось бы автору донести до читателей:

– динамика фундаментальной и прикладной науки не может быть представлена как «саморазвивающийся» процесс, в котором личность ученого играет незначительную роль, следствием такого подхода является утрата наукой своей творческой сущности и духовно-интеллектуальной многомерности;

– история науки – это всегда судьбы великих и талантливых ученых, результатом работы которых является не только генезис самой науки, но и ее развитие. Результатом работы С.П. Королёва явилась революция в области освоения космического пространства.

*Результаты исследования могут быть использованы* в процессе преподавания дисциплин социально-гуманитарного цикла. Проведенный анализ послужит теоретической и методологической основой для дальнейшего изучения роли ученого в науке.

\*\*\*

12 января 1907 года родился Сергей Королёв – ракетостроитель, российский ученый-конструктор ракетно-космических систем, действительный член Академии наук СССР (1958 год, член-корреспондент с 1953 года), дважды Герой Социалистического Труда (1956, 1961), лауреат Ленинской премии (1957); руководитель советских ракетной и космической программ, основоположник практической космонавтики, и прочая, и прочая...

Речь пойдет не просто о жизни и ярких достижениях гениального конструктора космических кораблей Сергея Павловича Королёва, интерес представляет проблема «человек в науке», феномен талантливой личности в истории теоретической мысли. В рамках данной темы пересекается целый спектр проблем: условия становления и реализации творческого потенциала личности, специфика научного творчества, роль яркой и неординарной личности в истории науки.

Выделяя ряд характерных черт, отличающих науку от других связанных с ней феноменов культуры, принято отмечать, что результаты науки безличны, и индивидуальные особенности ученого никак не могут отразиться на результатах научного исследования. Однако любому результату предшествует конкретная деятельность, и от того, какой будет эта деятельность и кто будет творить, зависит качество конечного продукта. Очевидным является и то, что без своего создателя наука вообще невозможна, что доказывает анализ структуры научной деятельности, которая предполагает выделение субъекта научной деятельности, объекта научной деятельности, цели научной деятельности, эмпирических и теоретических методов научного познания, теоретической базы исследования, специального оборудования. При этом все элементы замыкаются на самом субъекте научной деятельности: они определяются им, зависят от его выбора и предпочтений, его знаний, умений, навыков и, наконец, желаний.

В исследовании проблемы «человек в науке» можно выделить три этапа, каждый из которых характеризуется разными подходами, обусловленными динамикой самой науки. Такой точки зрения придерживалась, например, доктор социологических наук Е.З. Мирская [1].

В рамках первого этапа, длившегося вплоть до середины XX века, личность ученого рассматривалась как причина всех событий, происходящих в науке. Господствовало представление об *ученом-творце*, определяющем весь процесс научной деятельности. Наука рассматривалась как результат деятельности выдающихся творческих личностей, и интерес представляло само научное творчество, в то время как мотив творческой деятельности, предпосылки активации научного творчества, вопросы становления и развития творческой личности оставались вне поля зрения исследователей. Такое описание не раскрывало всей картины происходящего в науке. При этом однозначно решалась проблема места и роли ученого в науке, утверждалось, что развитие науки всецело зависит от ученого-одиночки. Что же касается каузальных связей, то они оставались без внимания, как и ответы на вопросы, почему ученый обладает таким, а не другим набором качеств, почему он интересуется этими, а не иными проблемами и т. д.

В рамках данного этапа сформировался традиционный, или классический, подход к пониманию образа ученого и его деятельности, где ученый есть выдающаяся личность-творец, деятельностью которой является научное творчество. При этом исключительность ученого объяснялась лишь особенностью его внутренних качеств, вследствие чего истоки его экстраординарности и одаренности следовало искать только в нем самом, а социальную среду рассматривать как фон его профессиональной деятельности. В этой ситуации научное знание воспринималось как простая сумма личных вкладов. Отметим также, что классический подход воплотил в себе требования науки того времени, нарисовав эталон такого деятеля, который ей был нужен, деятеля, высшими ценностями которого являлись истина и творчество.

Однако с середины XX века научно-технический прогресс привел к резкому возрастанию коллективной составляющей труда в науке, что способствовало возрастанию соавторской активности ученых. Если в начале XX века 82% научных публикаций принадлежало «соло-авторам», то уже к 60-м годам удельный вес такого рода индивидуальных работ снизился до 33%. За полвека возросла доля работ, написанных двумя авторами (с 16 до 40%) и тремя авторами (с 2 до 17%) [2].

Стремительное развитие науки и усложнение ее организационных форм привело к тому, что ученому, в особенности естествоиспытателю, оказалось сложно, а подчас и невозможно работать в одиночку. В доказательство данного утверждения, можно привести следующие

доводы. Во-первых, в сложившихся условиях ученому требовалась дорогостоящая аппаратура, оборудование и материалы для проведения исследований. Вряд ли всем этим мог обладать один человек. Во-вторых, наблюдалось усложнение проблем, и их решение подчас оказывалось не под силу одному ученому. Исследовательские проекты все чаще требовали привлечения специалистов из самых разных научных дисциплин, превращаясь в междисциплинарные. Так, например, космическая пилотируемая программа не могла бы быть реализована без тесного взаимодействия самых разных специалистов: физиков, математиков, компьютерщиков, физиологов и даже психологов.

Наука середины XX века – это, в том числе, и научное сообщество, представляющее собой сложную структуру объединений ученых – от крупных региональных общностей до первичных коллективов в составе НИИ и вузов. Становление второго этапа в исследовании проблемы «человек в науке» приходится именно на это время. Точнее, на 60-е годы XX века, когда интерес исследователей концентрируется не столько на ученом-творце, сколько на *научном сообществе* и анализе отношений, связывающих людей в их деятельности, на закономерностях научной деятельности и условиях функционирования науки. Предметом исследования становится *деятельность в социальном институте науки*: по каким правилам действуют люди; какими нормами они руководствуются; какие роли выполняют; чем стимулируются (система ценностей и наград); в какие объективные структуры (стратификации, коммуникации) включены. Такой подход был характерен для американской социологии, в частности для одного из ведущих аналитиков-социологов XX века Р.К. Мертона (1910–2003) и его школы.

В рамках такой позиции рождался вывод, что наука есть самоорганизующийся и саморегулирующийся организм, развивающийся по неким своим объективным законам, независимым от людей. Ученый оказывался следствием данной социальной системы, так как именно наука необходимым образом детерминировала его деятельность, формировала его интеллект и интересы, развивала его способности, готовила на предусмотренные роли. Он оказывался «винтиком» отлаженной системы, лишенным творческой самостоятельности.

Вместо ученого одиночки появился коллектив, трудовая деятельность которого полностью зависела от внешних инвестиций. Типичным ученым стал узкий специалист, работающий в профессиональной организации, ограничивавшей его независимость в выборе проблемы и способах ее решения. Вопрос о творческой личности ушел на второй план, что не могло не сказаться на характере ученого, а также системе его внутренних ценностей и ориентиров.

Родилась иллюзия, что наука есть сумма научных программ, учреждений и денег, а также научных работников, различающихся по статусу, должности и жалованию. Выводом стало утверждение, что наука может быть эффективной без ярких индивидуальностей, за счет удачной организации. На деле подобная формула не согласовывалась с фактами.

П.Л. Капица (1894–1984), советский физик, видный организатор науки, в докладе на Международном colloquium, посвященном 100-летию со дня рождения Э. Резерфорда, рассуждая на тему «Роль выдающегося ученого в развитии науки», задавался вопросом: «Может быть, гениального человека можно заменить коллективом менее способных людей и при этом успех их научной работы в полной мере может быть обеспечен ее хорошей организацией, т. е. заменить качество количеством?» [3]. По всей видимости, на практике это и проще, и надежнее, чем возиться с гениями, которые к тому же часто бывают непокладистыми людьми. Такая точка зрения действительно существует. В ней есть доля правды, так как хорошо организованные институты, несомненно, способствуют развитию науки. «Но я не думаю, – утверждал П.Л. Капица, – что научные институты могут успешно работать без крупных руководителей и ведущих ученых. Например, из истории хорошо известно, что войскам без хорошего полководца не удастся успешно побеждать. Вопрос, который следует разобрать, – может ли армия ученых успешно завоевывать природу без своих крупных полководцев?» [3].

Скорее всего стремление нивелировать безусловную ценность личности привело бы к потере ее неопределимого опыта и уникального вклада в развитие науки.

Начало третьего этапа в решении исследуемой проблемы приходится на 70-е годы XX века, когда американский историк и философ науки Т. Кун (1922–1996) продемонстрировал релятивность научного знания, обратив внимание на то, что любой критерий имеет смысл только в рамках определенной парадигмы. Вспыхнул интерес к содержанию научного знания, понимавшемуся теперь как элемент сознания профессиональной группы. В результате этого возникла *социология научного знания*, способствовавшая критике позитивистски ориентированной мертоновской социологии науки. Критика велась с позиций «интерпретивной социологии», совершенно иначе понимающей роль субъекта в научном познании.

«Интерпретивная социология» вновь (как и в рамках первого этапа) выдвинула субъект познания на первый план, превратив его в активную силу. Налицо абсолютизация значимости роли субъекта в науке. Различие лишь в том, что ученый рассматривался не как психологическая индивидуальность, а как член социально функционирующей научной группы. С одной стороны, подчеркивалась неповторимость творческой личности ученого, доказывалось, что печать уникальности лежит на всех ее проектах и озарениях, следовательно, *личностное невозможно изгнать из науки*. С другой стороны, отмечалось, что научное творчество изначально коллективно, социально и за каждым его проявлением скрыта работа множества умов. Только завязывая с первых же шагов в науке всё усложняющиеся научные контакты, индивид осваивает нормы и ценности сообщества, членом которого он с течением времени становится. Тем самым была сделана попытка учесть зависимость субъекта науки от разнообразных социальных воздействий и от принятой к текущему моменту системы научного знания.

На сегодняшнем этапе развития науковедения, казалось бы, стало невозможно игнорировать тот факт, что открытия делает не абстрактная наука, а конкретные ее представители. Не существует «мышления вообще» или «мышления науки», а есть мышление конкретного человека, которое является неотъемлемой составляющей любой человеческой личности и ее жизнедеятельности. В логике такого подхода допустимы вопросы: «А что было бы, если бы, скажем, К.Э. Циолковский или С.П. Королёв не родились на свет?».

Но несмотря на это, по мнению известного российского политолога, доктора философских наук В.И. Пантина, «в последние десятилетия *вновь наблюдается опасная тенденция, заключающаяся в попытке представить динамику фундаментальной и прикладной науки как «саморазвивающийся» процесс, в котором личность ученого играет очень малую роль, а все решают выделенные на науку деньги и ее организация»* [4]. Такая позиция во многом является следствием технократически-бюрократического подхода к науке. Мы сталкиваемся с коммерциализацией научных исследований и формализацией того, что априори не должно быть формализовано. Опасность такого подхода состоит в том, что наука начинает утрачивать свою творческую сущность и духовно-интеллектуальную многомерность. Воспроизводится шаблон, наблюдается стандартизация, а в результате на второй план уходит креативность, уникальность, порождая инерцию, по сути, бездеятельность и отсутствие инициативы.

Несомненно, каждый из выше обозначенных этапов внес свой вклад в развитие проблемы «человек в науке». Условно их сущность укладывается в достаточно простую формулу, которая может выглядеть так: «Ученый-творец определяет развитие науки – науку делают научные коллективы, и ее эффективность не зависит от ярких индивидуальностей – наука зависит от субъекта, чье творчество социально детерминировано».

Можно говорить о плюсах и минусах, о сходстве и различиях, о перспективах и проблемах каждого подхода. Сталкиваясь с первым, видишь достаточно упрощенно всё то, что происходит в науке и склоняешься к утверждению, что история науки – это совокупность конкретных открытий, сделанных яркими учеными-творцами. И тогда история науки – это, например, открытия, сделанные такими яркими индивидуальностями, как Г. Галилей (1564–

1642), Р. Бойль (1627–1691), И. Ньютон (1643–1727), А.-М. Ампер (1775–1836), А. Авогадро (1776–1856), М. Фарадей (1791–1867), А. Беккерель (1852–1908), М. Планк (1858–1947), М. Борн (1882–1970), Н. Бор (1885–1962), Л. де Бройль (1892–1987), В. Гейзенберг (1901–1976), А. Эйнштейн (1879–1955) и мн. др. Фиксируется конечный результат, внимание отстраняется на личности ученого, чья уникальность и исключительность есть природный дар и результат работы над самим собой. Академик П.Л. Капица писал: «Хорошо известно, что как ни поддерживай творчески неодаренного человека, какие благоприятные условия ему ни предоставляй, все равно он ничего крупного, значительного, а тем более выдающегося не создаст» [5]. Из чего следует, что спецификой творческого труда не только в науке, но и в искусстве, литературе, музыке, является *сугубо личностный характер*.

Знакомясь с тем, как менялись представления о роли и месте человека в науке, можно заметить очевидное сходство между первым и третьим этапами. И там, и там внимание сосредоточено на личности творца. Существенное же различие наблюдается в контексте, задаваемом «интерпретивной социологией», доказывающей, что ошибочно изучать научное творчество, не обращаясь к внутренним предпосылкам и внешним обстоятельствам его становления и развития.

Не случайно параллельно с обсуждением проблемы человека в науке появляется масса работ и исследований философов, психологов, нейрофизиологов, раскрывающих *факторы и условия, влияющие на творческую деятельность человека*.

Так, например, советский ученый, доктор физико-математических наук Д.И. Кирнос (1905–1995) обратил внимание на роль эмоциональной сферы, сенсорики, типа высшей нервной деятельности [6]. По мнению же профессора психологии Оклахомского университета Р. Стернберга (род. в 1949), среди факторов, оказывающих влияние на творческую деятельность, следует отметить интеллектуальные способности (синтетические, аналитические и практические умения), заключающиеся в умении убеждать в ценности идеи, а также независимость мышления от стереотипов и внешнего влияния [7].

Внимание исследователей<sup>1</sup> было сосредоточено на индивидуальных чертах, которыми должна обладать творческая личность, на характерологических свойствах и мотивации научного творчества. Результатом данной работы явилась констатация разнообразия факторов, детерминирующих творческий процесс. Среди них были названы потребности и запросы общества; конкретные экономические и социальные условия; общий объем знаний и достижений в определенной области деятельности; возможности человеческого сознания; биологические и психологические особенности конкретного субъекта, его интеллектуальные способности, уровень знаний и жизненный опыт; личностные черты и т.д. Систематизация данных факторов привела к выделению *личностных*, или внутренних, детерминант, обусловленных психологическими, физиологическими и другими особенностями субъекта, и *социальных*, или внешних, действие которых определяется внешними обстоятельствами и не зависит от субъекта деятельности.

В ряду же условий, определяющих возможность развития творческого отношения к научной деятельности, отмечались *организационные и коммуникативные условия*.

Под организационными условиями понимали отказ от жесткого контроля, предоставление достаточной степени свободы для научной деятельности; видение ученым перспективы исследования, а не отдельных его этапов; возможность открыто выражать свою точку зрения; индивидуальный подход к организации режима дня ученого, его деятельности (сроков выполнения исследования, места работы, планов) и т. д. Данные условия характеризуют особенности организации и контроля научной деятельности в учреждении и выражаются в дихотомии «демократизм – авторитаризм».

<sup>1</sup> См. работы: С. Ариети, Д.Б. Богоявленской, Дж. Говена, Л.Б. Ермолаевой-Томиной, М. Олсона, Й. Рензулли, Л.Н. Рожинной, Д.К. Саймонтона, Э.П. Торранса и др.



Коммуникативные условия предполагали следующее: возможность работать в команде, над общим проектом в соответствии со своими интересами; неформальное общение, отношения доверия и понимания, отсутствие статусного барьера между учеными разного уровня; толерантность к другой точке зрения, образу жизни, возможность «быть не таким как все» и в личном, и в исследовательском плане; наличие культуры дискуссии, научного диалога, обмена мнениями, опытом. Недаром советский и российский психолог, историк науки, специалист по истории науки М.Г. Ярошевский (1915–2001) определял творчество как «когнитивно-диалогическую активность субъекта» [8].

Есть и другие условия, способствующие творческой деятельности. С точки зрения советского и российского философа, специалиста в области истории и философии науки А.В. Ахутина, «деятельность, достойная называться мышлением, начинается только тогда, когда человек сталкивается с задачей, не разрешимой с помощью стандартных приемов» [9]. В научном творчестве не должно быть жестких алгоритмов и готовых схем, так как это ведет к излишней регламентации. И важно поощрять, стимулировать оригинальность и нестандартность, ведь творчество – это «одна из наиболее естественных форм реализации потребности в поиске» [10]. В этой связи рождается понимание, как важно поощрять инновации, свой подход к научной проблеме, критичность в отношении устоявшихся методов. Насколько значительную роль играют доступность информации и достаточное количество времени, создающие возможности для научного поиска. Как ценны ориентация ученого на процесс научного поиска и стимулирование внутренних мотивов его научной деятельности (общественная значимость исследования, стремление к истине).

О научном творчестве как исключительно сложном виде профессиональной деятельности писалось много. В частности, академик В.А. Энгельгардт (1894–1984) отмечал, что в труде ученого много «упорной, длительной, часто однообразной работы, разочарований, обманутых надежд и ожиданий, непрестанного преодоления трудностей и неожиданных препятствий, возникающих одно за другим»<sup>2</sup>. Судьба *Сергея Павловича Королёва* – яркий тому пример. Перед нами ученый-исследователь, поглощенный проблемами науки. Его страстная увлеченность, одержимость научной идеей, поиском путей ее решения обуславливали повседневный огромный труд и постоянную работу мысли над разрешаемыми проблемами. Не секрет, что только *повседневное трудолюбие* формирует творческую личность, ибо сами по себе природные творческие способности того или иного человека – это лишь задатки, предпосылки, своеобразные зародыши будущего таланта. И именно оно способствовало интенсивному развитию его творческих способностей, совершенствованию его методологии научной работы, стиля научного мышления и научного почерка.

Творческий путь выдающегося ученого есть исключительное событие науки, а значит, биографии таких людей представляют собой «коллекцию уникальных случаев», знакомство с которыми дает исследователю шанс разобраться в механизмах становления творческой личности. При этом важно изучить не только жизненные события, способствующие формированию особенностей личности ученого и его научного мышления, но и индивидуальные методы и стратегии решения им профессиональных задач. Это позволит увидеть, каким образом ученый как субъект познания «творил» свою судьбу, а также прикоснуться к тайне его успеха.

О Сергее Павловиче Королёве говорили и говорят как о человеке, внесшем огромный вклад в развитие практической космонавтики. Инженер по образованию, ученый-испытатель по складу ума, он был страстно увлечен авиацией, поэтому вряд ли знакомство с работами К.Э. Циолковского было для него случайностью. Важно другое. В 22 года они увлекли будущего конструктора идеей освоения космического пространства.

В поисках условий и предпосылок становления ученого, вошедшего в историю науки, часто задаются вопросом, *кто был его наставником?* Научный руководитель, друг, коллега,

<sup>2</sup> Цит. по: *Медведев Л.Н.* Методология научного творчества. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – С. 99.

родители или просто известный ученый? Кто в силу своих личностных и профессиональных особенностей мог стать образцом для подражания и сыграть *огромную роль в формировании будущего творца науки?* Такую роль в судьбе С.П. Королева сыграл ученый-самоучка, изобретатель, школьный учитель и основоположник теоретической космонавтики К.Э. Циолковский.

По воспоминаниям матери С.П. Королёва Марии Николаевны [11], весной 1929 года он прочел работу К.Э. Циолковского «Исследование мировых пространств реактивными приборами». Начал читать и уже не смог оторваться. Циолковский писал: «...предлагаю реактивный прибор, то есть род ракеты, но ракеты грандиозной и особенным образом устроенной. Мысль не новая, но вычисления, относящиеся к ней, дают столь значительные результаты, что умолчать о них было бы большим грехом. Эта моя работа далеко не рассматривает всех сторон дела и совсем не решает его с практической стороны – относительно осуществимости; но в далеком будущем уже виднеются сквозь туман перспективы до такой степени обольстительные и важные, что о них едва ли теперь кто мечтает» [12]. Оказывается, можно летать не только на планерах и самолетах, не только в пределах атмосферы!

Теоретик и практик, К.Э. Циолковский и С.П. Королёв, стремились к общей цели – преодолеть земное тяготение, выйти в околосолнечное пространство, полететь к другим планетам. К.Э. Циолковский писал: «Вы же знаете, что я отдал всю свою жизнь во имя межпланетных путешествий» [13]. Мечтая о счастливой космической цивилизации, он еще в начале XX века не только теоретически обосновал возможность полета в околосолнечном пространстве, но и предопределил облик будущего межпланетного корабля. Реализации этой мечты посвятил свою жизнь и С.П. Королёв. В 24 года о нем уже говорили как о талантливом авиаконструкторе. К тому времени на его планере были выполнены мертвые петли, и это было впервые в мире. Последующие изобретения, как правило, отмечались грифом «впервые в стране и в мире».

Мечта о полетах на невиданных высотах и скоростях предполагала создание ракетной техники. В ходе решения данной задачи С.П. Королёв становится генератором многих неординарных идей. С его именем связаны самые яркие страницы истории нашего государства – эра освоения космического пространства, первый спутник земли, первый полет человека в космос, первый выход космонавта в открытый космос, многолетняя работа орбитальной станции и мн. др. «*То, что казалось несбыточным на протяжении веков, что еще вчера было лишь дерзновенной мечтой, сегодня становится реальной задачей, а завтра – свершением!*» (С.П. Королёв). Сергею Королёву больше, чем кому-либо другому принадлежит заслуга в том, что космический век стал реальностью.

Уже в Московском высшем техническом училище, куда он в 1926 году переводится из Киевского политехнического института, ярко проявилась *активная жизненная позиция* будущего Главного конструктора. Об этом свидетельствуют его инициативность, энергичность, повседневная деятельность. С.П. Королёва интересовало все, что имело отношение к авиации, поэтому он создавал планеры, учился в летной школе, трудился на авиационном заводе. Ему удалось не только разработать самолет собственной конструкции, представить его в качестве дипломного проекта, но построить и испытать его в полете. Выходя за рамки учебного плана, он проявлял *целеустремленность и упорство в освоении наук*. В этот период начала проявляться черта характера, которая впоследствии привела С.П. Королёва в ракетную технику. Это – *умение отойти от шаблона, утвердить свою оригинальную точку зрения, идти непроторенными дорогами*. В результате рождается планер, способный совершать фигуры высшего пилотажа, и разрабатывается самолет СК-4 оригинальной конструкции, готовый к беспосадочному полету в течение 12 часов.

Активность жизненной позиции С.П. Королёва переходила в новое качество – в *умение доводить до конца задуманное* даже тогда, когда всем было очевидно, что состоялось вторжение в сферу неизведанного. Влекла тайна, а страстность натуры способствовала тому, что ему становилось доступным то, что казалось никому не по силам. Великий А. Эйнштейн в

свое время сказал: «Самое прекрасное, что мы можем испытать, – это ощущение тайны. Она источник всякого подлинного искусства и всей науки. Тот, кто никогда не испытывал этого чувства, кто не умеет остановиться и задуматься, охваченный робким восторгом, тот подобен мертвецу и глаза его закрыты» [14]. Потому-то и пришел С.П. Королёв в ракетную технику – туда, где больше всего были нужны такие активные и ищущие люди, где был возможен научный поиск.

Сталкиваясь с человеком, *страстно увлеченным поиском* решения научной задачи, ты наблюдаешь ненасытный интерес к познанию, погруженность в проблему, одержимость идеей, радость открытия. Его влечет романтика научного поиска, которая не только делает его счастливым, но и превращается в смысл жизни. Истинный ученый – это всегда подвижник науки, творец нового, ее служащий. Выдающийся немецкий зоолог Альфред Брем (1829–1884) говорил, что «наука сама по себе неотразимо привлекательна и награждает своих почитателей уже тем наслаждением, с которым они служат ей» [15]. Кроме того, решая ту или иную проблему, ученый каждый раз доказывает себе и другим, чего он стоит как профессионал. *Мотив поддержания самооценки* является немаловажным дополнительным фактором, стимулирующим любую профессиональную деятельность.

Следует подчеркнуть, что личная научная *эффективность ученого зависит* не просто *от уровня мотивации*, а от ее «направленности»: *от степени ориентированности на науку*. Жизнь и деятельность С.П. Королёва мотивированы стремлением реализовать свою мечту – преодолеть земное притяжение и осуществить космический полет. В случае с С.П. Королёвым, это смыслообразующий мотив, с которым сопряжены глубинные компоненты его личности: жизненные цели, ценности и ожидания, всё то, что составляет смысл его деятельности. На пути реализации этого стратегического замысла всё было неизведанным, сложным, рождалось в муках, требовало мужества, преодоления косности власть предержащих. «Было осознание того, что почти всё делается впервые, что очень немногие, а в некоторых случаях и вообще никто в мире, не может понять тебя. Что с тобой не соглашаются не столько потому, что имеют другую точку зрения, а потому, что еще не понимают самого существования тех проблем, над решением которых приходится биться, биться в одиночку, принимая на себя ответственность не только за свою собственную судьбу, но и за судьбы миллионов других людей, за судьбы человечества» [16].

Фактологическая история реализации такого замысла ведет свой отсчет с 1933 года. В этот год 17 августа в небо взлетела первая ракета. Запуск состоялся в подмосковном поселке Нахабино. Высота полета составила всего 400 метров, но с них начались тысячи километров межпланетных перелетов. В осуществлении проекта были заняты участники Группы изучения реактивного движения во главе с Сергеем Королёвым. Он был и одним из инициаторов образования Реактивного научно-исследовательского института, открывшего новые перспективы в работе. Программа исследований института была разработана и предложена К.Э. Циолковским. В 18 пунктах программы содержался перечень исследований по ракетной технике с упором на экспериментальную отработку ракет и двигателей. Связав свою жизнь с институтом, С.П. Королёв работал сначала как главный инженер, потом как заместитель начальника института, начальник отдела крылатых ракет, начальник группы ракетных аппаратов.

Начиная с 1948 года, он принимал участие в серии проектов, направленных на разработку баллистических ракет. В течение одного только 1954 года были созданы различные модификации ракет Р-1, Р-5 и завершена сложная и ответственная работа над ракетой Р-5М – с ядерным боевым зарядом. В 1956 году под его руководством была разработана двухступенчатая межконтинентальная баллистическая ракета Р-7 (разг. «семерка»), модификация которой состояла на вооружении РВСН СССР с 20 января 1960 года по 1968 год. В 1957 году С.П. Королёв создал первые баллистические ракеты на стабильных компонентах топлива мобильного наземного и морского базирования и явился первопроходцем в этих новых и важных направлениях развития ракетного вооружения.

Работая над боевыми баллистическими ракетами, С.П. Королёв по-прежнему не оставлял *идею покорения космоса человеком*. Запуск искусственного спутника нашей планеты, состоявшийся 4 октября 1957 года, можно считать первым шагом на пути решения этой *сверхзадачи*. В основу его разработки легли боевые ракеты с трех- и четырехступенчатым носителем. Полет спутника, имевший ошеломляющий успех, способствовал международному авторитету страны, само же слово «спутник» вошло в языки всех народов мира.

Параллельно с подготовкой к пилотируемым полетам велись работы над спутниками научного, народнохозяйственного и оборонного назначения. В 1958 году разрабатываются и выводятся в космос геофизический Спутник-3, а затем и парные спутники «Электрон» для исследования радиационных поясов Земли. В 1959 году создаются и запускаются к Луне три автоматические станции: «Луна-1» пролетела вблизи Луны; «Луна-2» впервые в мире совершила перелет с Земли на другое космическое тело, доставив на Луну вымпел Советского Союза; «Луна-3» впервые выполнила фотографирование обратной (невидимой с Земли) стороны Луны. В дальнейшем С.П. Королёв начнет разработку более совершенного лунного аппарата для мягкой посадки на поверхность Луны, фотографирования и передачи на Землю лунной панорамы (объект Е-6).

Наконец 12 апреля 1961 года ему удалось реализовать свой самый смелый проект, поразивший воображение мировой общественности. Пилотируемый космический корабль «Восток-1» сделал возможным первый в мире полет человека – Ю.А. Гагарина – по околоземной орбите. Полет Ю.А. Гагарина сделал гипотезу о возможности практической деятельности человека в космосе реальностью, открыл новое направление в развитии цивилизации, и в этом его непреходящее научное значение. Теоретическая космонавтика, начавшаяся в трудах К.Э. Циолковского с представления о жидкостной ракете, превратилась у С.П. Королёва в практическую деятельность по реализации идеи полета человека в космическое пространство.

Реализация таких проектов во многом зависела от *громдой энергии*, которой С.П. Королёв умел заражать окружающих, *от его решительности и суровости, от его целеустремленности и силы воли*. Давний сподвижник С.П. Королёва М.К. Тихонравов, характеризуя своего друга, говорил: «Королёв – это личность. Масштабная. С очень высокой целью. С волей, умеющей сдерживать радость и противостоять неудачам. Он был и остается лидером» [16]. С.П. Королёв – это *сплав холодного рационализма и мечтательности*.

Б.В. Раушенбах (1915–2001), член-корреспондент Академии наук СССР, писал: «Работать с Сергеем Павловичем было трудно, но интересно: и повышенная требовательность, короткие сроки, в которые он считал нужным завершить очередное задание, и новизна, таящая в себе не только приятные неожиданности, – все это заставляло всех работавших с ним постоянно находиться в состоянии сильнейшего нервного напряжения. Работа шла буквально днем и ночью и в выходные дни... Стремление использовать каждую минуту приводило, например, к тому, что полеты на космодром совершались только ночью... Сергей Павлович просто не мог себе представить, что дорога может «съесть» рабочий день... Полубессонная ночь в пути считалась вполне достаточным отдыхом для него самого и его сотрудников» [17].

О невероятном трудолюбии С.П. Королёва вспоминал и П.А. Агаджанов (1923–2001), профессор, доктор технических наук: «Как я помню, он практически никогда не отдыхал. Свободного времени как такового у него не было» [17]. Для С.П. Королёва трудолюбие – это не просто способность длительное время уделять любимой работе, а готовность действовать с полной отдачей. Такой подход к работе был залогом его жизненного успеха, рождал уверенность в своих способностях и позволял испытывать радость от самого процесса работы и от его результатов.

Об огромном значении трудолюбия в науке высказывались многие выдающиеся ученые. Некоторые из них приписывали все свои научные успехи исключительно этому качеству. Так, например, считавшийся «королем математиков» Карл Фридрих Гаусс (1777–1855)

утверждал, что он не отличался никакими особыми природными дарованиями, а обладал только прилежанием. В свою очередь, Томас Эдисон (1847–1931), американский изобретатель, получивший за свою жизнь около 5 тысяч патентов, говорил, что это – 1% природного дарования и 99% тяжелого труда.

В процессе повседневного труда ученый постоянно совершенствуется, напряженный труд способствует развитию. Но заслуга С.П. Королёва не только в том, что он ежедневно посвящал себя работе. Своей энергией и жадной открытию он заражал окружающих, ему удалось не просто найти единомышленников, а создать школу ракетостроения, подготовить специалистов высшей квалификации, технически смелых и самоотверженно преданных делу.

Его жизнь удивительна: она наполнена событиями и плодотворна, но о ней ничего не знали современники. Его называли «К. Сергеев», сведения о нем отсутствовали в энциклопедиях и справочниках. Газеты о нем не писали. Великий ученый был едва ли не самым засекреченным человеком в СССР. Имя гениального конструктора, ученого, организатора, летчика стало известно только после его смерти. После смерти он стал символом эпохи: нестигаемым, волевым, преданным своему делу и науке, фанатиком космоса.

И последнее, но очень важное: в качестве основополагающих отличительных признаков его натуры можно выделить независимость, самодостаточность, высокую мотивацию научной деятельности, постоянное движение и тягу к новизне, смелость и готовность к риску, бесстрашное умение идти против общепринятых научных взглядов, выдвигать и высказывать самые сумасшедшие идеи. Эти уникальные качества, как унаследованные, так и сформировавшиеся под действием внешних обстоятельств, во-первых, обеспечили С.П. Королёву возможность прорыва за пределы общеизвестных знаний и концепций, а во-вторых, позволили ему остаться самим собой, выстоять в труднейших жизненных ситуациях.

Подводя итог вышесказанному, отметим, наука – это результат деятельности человека, без которого ее возникновение и развитие было бы невозможно. Казалось бы, этого утверждения достаточно, чтобы снять поставленную проблему. Тем не менее из истории науковедения видно, что при оценке роли человека в науке нет однозначного решения, и эта неоднозначность отчасти объясняется существующими различиями в подходах к пониманию самой сути развития науки. Встает вопрос, а можно ли науку рассматривать как самоорганизующийся и саморегулирующийся организм. Есть ли объективные законы, по которым она может развиваться независимо от человека? Весь спектр мнений по этой проблеме сводится к двум полярным решениям. В рамках первого доказывається, что роль ученого-творца не следует подвергать сомнению, именно он играет роль первой скрипки в науке, от него и только от него зависит всё то, что происходит в ней. В этом случае существенное значение приобретают его талант, идеи, целеустремленность, характер, воспитание и мн. др. Подобное решение предполагает изучение всех обстоятельств, способствующих формированию такой творческой личности, а также особенностей самого научного творчества. И интерес к биографиям великих ученых очевиден. Другой же подход выводит неординарную личность ученого-творца на второй план. И нас убеждают, что развитие науки возможно без ярких индивидуальностей за счет удачной организации самой науки. Но хотелось бы повториться: на деле подобная формула не согласуется с фактами.

### Список используемых источников

1. *Мирская Е.З.* Человек в науке: социологические дискуссии XX века // Социология науки и технологий. – 2010. – Т. 1, № 4. – С. 27–29.
2. *Медведев Л.Н.* Методология научного творчества. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – С. 90.
3. *Капица П.Л.* Эксперимент, теория, практика. – М.: Наука, 1974. – С. 160.

4. *Пантин В.И.* Роль личности в науке // История и современность. – 2015. – № 2 (22). – С. 202.
5. *Капица П.Л.* Эксперимент, теория, практика. – М.: Наука, 1974. – С. 198.
6. *Кирнос Д.И.* Индивидуальность и творческое мышление. – М., 1992. – С. 171.
7. *Дружинин В.Н.* Психология творчества // Психологический журнал. – 2005. – № 5. – С. 101.
8. *Ярошевский М.Г.* Психология творчества и творчество в психологии // Вопросы психологии. – 1985. – № 6. – С. 14.
9. *Дружинин В.Н.* Психология творчества // Психологический журнал. – 2005. – № 5. – С. 81.
10. *Ярошевский М.Г.* Психология творчества и творчество в психологии // Вопросы психологии. – 1985. – № 6. – С. 61.
11. Московская планерная школа // Семейные истории. Королев С.П. – URL: <http://www.famhist.ru/famhist/korol/00107864.htm> (дата обращения: 2.06.2017).
12. *Салахутдинов Г.М.* Блеск и нищета К.Э. Циолковского. – URL: [http://www.telenir.net/istorija/blesk\\_i\\_nisheta\\_k\\_je\\_ciolkovskogo/p1.php](http://www.telenir.net/istorija/blesk_i_nisheta_k_je_ciolkovskogo/p1.php) (дата обращения: 2.06.2017).
13. *Бугров В.* Циолковский и Королев: мечты и реальность. – URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/11556/> (дата обращения: 13.05.2017).
14. Время искать / сост. В. Захарченко; худож. Р. Авотин. – М.: Молодая гвардия, 1985. – С. 188.
15. *Шепелёв В.В.* О роли личности в науке // Наука и техника в Якутии. – 2009. – № 2 (17). – С. 5.
16. *Литвак Б.Г.* Великие управленцы: мастер класс: практические занятия по управлению. – М., 2003. – URL: [http://www.bglitvak.ru/?page\\_id=276/&tpwf\\_mode=main](http://www.bglitvak.ru/?page_id=276/&tpwf_mode=main) (дата обращения: 30.05.2017).
17. С.П. Королёв (к 70-летию со дня рождения): сборник статей. – М.: Знание, 1977. – URL: <http://testpilot.ru/espace/bibl/tm/1977/4-korolev.html> (дата обращения: 30.05.2017).



И.Б. Казакова

следственный отдел по г. Балашиха Главного следственного управления  
Следственного комитета России

## **УГОЛОВНО-ПРАВОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УМЫШЛЕННОГО УНИЧТОЖЕНИЯ ИЛИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЕННОСЛУЖАЩИМИ ВОЕННОГО ИМУЩЕСТВА**

В настоящее время проблема умышленного уничтожения или повреждения военными военное имущество приобретает особую актуальность, и связано это прежде всего с тем, что в Вооруженные силы поступает новое, самое современное оружие и боевая техника.

В представленной публикации проведен анализ статей УК РФ, рассматривающих преступления против военной службы. Дается характеристика преступления, выражающегося в форме умышленного уничтожения или повреждения военными военное имущество. В полной мере и широко раскрываются признаки и состав преступления умышленного уничтожения или повреждения военное имущество. Особое внимание уделено раскрытию понятия «проблемы военной техники» как предмета состава преступления.

На основании изложенной в статье серьезной теоретической базы и обширной юридической практики, сформулированы предложения в изменения ч.1 ст. 346 УК РФ.

Ключевые слова: военный, военное имущество, УК РФ, предметы преступления, оружие, военная техника.

Историко-правовой анализ показывает, что уголовная ответственность за «общеопасное» неосторожное уничтожение и повреждение имущества как преступное посягательство на собственность, повлекшее человеческие жертвы или иные тяжкие последствия, впервые предусматривается в УК РСФСР (1960). Уголовно-правовые нормы о простом неосторожном уничтожении и повреждении имущества как разновидности посягательств на собственность отсутствовали в законодательстве России советского периода. Уголовная ответственность за эти деяния, совершенные в крупном размере, была впервые установлена в первоначальной редакции УК РФ (1996).

УК РФ (1996) внес значительные изменения в нормы права, устанавливающие ответственность за посягательства на порядок пользования военным имуществом и его хранения, сформулировав ст. 346 УК РФ «Умышленное уничтожение или повреждение военного имущества» в следующей редакции:

1. Умышленное уничтожение или повреждение оружия, боеприпасов или предметов военной техники наказываются штрафом в размере до двухсот минимальных размеров оплаты труда или в размере заработной платы или иного дохода осужденного за период до двух месяцев, либо ограничением по военной службе на срок до двух лет, либо арестом на срок до трех месяцев, либо содержанием в дисциплинарной воинской части на срок до двух лет, либо лишением свободы на срок до двух лет.

2. Те же деяния, повлекшие тяжкие преступления, наказываются лишением свободы на срок до пяти лет.

Исключив из числа воинских преступлений промотание выданных в личное пользование военными, проходящим военную службу по призыву, предметов обмундирования и снаряжения, УК РФ (1996) ввел ответственность за уничтожение или повреждение военного имущества по неосторожности. Данная норма права не только усиливает охрану военного имущества, но и способствует воспитанию ответственности у каждого военного за выполнение своего воинского долга и повышение боеспособности войск и сил флота.

Военное имущество является составной частью государственного имущества, поэтому оно охраняется от преступных посягательств на него также нормами права, предусмотренными гл. 21, 24 УК РФ.

Однако нормы права вышеуказанных глав УК РФ (1996) применяются к военнослужащим, совершившим деяния, предусмотренные одной из статей этих глав, лишь в том случае, когда в числе норм права, устанавливающих ответственность за преступления против военной службы, отсутствует специальная норма, т.е. норма, устанавливающая ответственность за аналогичное деяние, но посягающее на порядок использования только военного имущества (например, ст. 167 УК РФ «Умышленное уничтожение и повреждение имущества» и ст. 346 УК РФ «Умышленное уничтожение и повреждение военного имущества»).

Отличительной особенностью конструирования в УК РФ (1996) общей и специальной норм, предусматривающих ответственность за посягательство на военное и невоенное имущество, является то, что специальная норма выделяется, с одной стороны, в зависимости от формы посягательства (только при уничтожении, повреждении и утрате), а с другой – от предмета преступления в пределах одной и той же нормы.

Так, например, если военнослужащий умышленно уничтожил телевизор, находившийся в комнате досуга, то содеянное образует общеуголовное преступление, так как телевизор не подпадает под понятие предметов военной техники (преступление в этом случае квалифицируется по ст. 167 УК РФ, а не по ст. 346 УК РФ). Если военнослужащим уничтожен телевизор, находившийся на командном пункте (пункте управления) как техническое средство управления войсками, то тот же предмет подпадает под понятие военной техники и содеянное образует преступление против военной службы (ст. 346 УК РФ). В данном случае имеет место выделение специальной нормы по отношению к общей (ст. 167 УК РФ) по предмету преступления, имеющему специальное военное предназначение, и субъекту преступления, обязанному соблюдать специальные правила обращения с этим предметом.

Если же преступление военнослужащего выразилось в том, что он нарушил порядок пользования военным имуществом в иной форме, например неправомерно завладел военным автомобилем без цели хищения, то он подлежит за содеянное уголовной ответственности по ст. 166 УК РФ, так как аналогичная норма в главе «Преступления против военной службы» отсутствует. Ее отсутствие в данной главе объясняется тем обстоятельством, что посягательство на порядок пользования военным имуществом в форме, указанной в ст. 166 УК РФ, по мнению законодателя, не отличается по характеру общественной опасности от совершенного в той же форме посягательства на иное, не военное имущество, независимо от его принадлежности определенным государственным структурам и иным формам собственности. Это относится и к остальным формам посягательства на военное имущество, предусмотренным ст. 158-166 УК РФ. Посягательства на военное имущество в этих формах преступления против военной службы не образуют, хотя и причиняют существенный вред боеспособности Вооруженных сил Российской Федерации.

Непосредственным объектом преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, является порядок обращения с оружием, боеприпасами и предметами военной техники, обеспечивающий их готовность к использованию по назначению. При этом оружие, боеприпасы и предметы военной техники являются составной частью государственного имущества, охрана которого от причинения вреда путем их уничтожения и повреждения осуществляется уголовно-правовыми средствами.

Поскольку оружие, боеприпасы и предметы военной техники предназначены для обеспечения военной безопасности страны, то вышеуказанные предметы исключены из перечня предметов, являющихся составной частью объекта преступлений против собственности, путем выделения их по характеру общественной опасности посягательства в специальную норму права, конкурирующую с общими нормами о преступлениях против собственности по объекту преступления. Поэтому деяние, ответственность за которое предусмотрена ст. 346



УК РФ, не образует совокупности преступлений с деянием, предусмотренным ст. 167 УК РФ.

Предметами преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, являются только оружие, боеприпасы и предметы военной техники. Применительно к данному составу вышеуказанный признак играет важную роль, так как именно предмет посягательства позволяет определить сущность и содержание непосредственных объектов преступления [1].

Следует помнить, что порядок сбережения военного имущества охраняется и общеуголовными нормами, такими как умышленное и неосторожное уничтожение или повреждение имущества (ст. 167, 168 УК РФ). В диспозиции ст. 346 УК РФ перечисляются «наиболее важные для обеспечения боеготовности войск виды военного имущества» [2].

Только при посягательстве на три вида военного имущества: оружие, боеприпасы, предметы военной техники родовым объектом выступает порядок прохождения военной службы, а непосредственным объектом – порядок сбережения военного имущества. По своей сути термины, используемые законодателем для описания предмета преступления в УК РФ, относятся к категории бланкетных признаков, и их содержание следует раскрывать с привлечением других правовых актов.

Что касается оружия и боеприпасов, то легальное толкование данных терминов дано в Федеральном законе «Об оружии» [3]. Однако это обстоятельство отнюдь не означает, что данный федеральный закон полностью снимает все вопросы, касающиеся оружия и боеприпасов как предметов преступлений, но он по крайней мере позволяет определить признаки, характеризующие некоторые их виды [4, 5].

Так, под оружием [3] следует понимать технические устройства, предназначенные для уничтожения живой силы, сооружений и огневых средств противника, находящиеся на вооружении Вооруженных сил Российской Федерации. Техническая характеристика, порядок применения оружия и его хранения определяются соответствующими наставлениями и руководствами для каждого вида оружия (например, стрелковое оружие, артиллерийское оружие, ядерное оружие и др.) и предметом преступления они становятся лишь тогда, когда находятся на снабжении воинских частей и подразделений.

Не признаются оружием в качестве предмета преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, технические устройства, не предназначенные для уничтожения живой силы, сооружений и огневых средств противника [например, ракетница, охотничье ружье, строительные, стартовые, сигнальные (звуковые) пистолеты, иные стреляющие устройства, не предназначенные для ведения боя].

В понятие оружия входит огнестрельное и холодное оружие. Однако ст. 346 УК РФ не дифференцирует оружие на вышеуказанные виды, что дает основания к предметам преступления, предусмотренным ст. 346 УК РФ, относить и холодное оружие, состоящее на вооружении воинских частей и подразделений, так как единственным предназначением военного холодного оружия является уничтожение живой силы противника. Однако иные виды холодного оружия, не предназначенные для ведения боя и уничтожения живой силы противника, к предметам преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, не относятся (например, охотничий нож, скальпель и т.п.).

В свою очередь, под боевыми припасами понимается прикладная часть соответствующего вида оружия, обладающая поражающим свойством, которое приводится в действие с помощью оружия. Поэтому боеприпасы изготавливаются для соответствующего вида оружия (патроны, снаряды, заряды, торпеды, мины, бомбы, взрывные устройства и т.д.).

Вместе с тем к предметам данного состава преступления относятся и такие технические устройства, составной частью которых является один из видов оружия – огнестрельного, артиллерийского и др. [например, бронетранспортер (БТР), боевая машина пехоты (БМП), танк, самоходная артиллерийская установка (САУ), боевой самолет и т.п.].

Однако понятие «предметы военной техники», к сожалению, до настоящего времени не имеет легального определения, так как содержание понятия «военная техника» в некоторых

нормативных правовых актах [6, 7] сформулировано для целей этих актов и использовать его применительно к нормам уголовного права не всегда представляется возможным.

Так, например, в определении «вооружение и военная техника», данном в Федеральном законе «О военно-техническом сотрудничестве Российской Федерации с иностранными государствами» [10], кроме различных видов оружия и технических средств, предназначенных для оснащения вооруженных сил, указывается также и военная форма одежды.

Представляется, что законодатель, устанавливая в диспозиции ст. 346 УК РФ равную ценность оружия, боеприпасов и военной техники, под техникой подразумевал только ту, которая непосредственно предназначена для ведения либо обеспечения военных действий.

В ранее действовавшем УК РСФСР (1960) предметом аналогичных преступлений выступало в целом всё военное имущество, хотя в диспозициях ст. 251 УК РСФСР (1960) имело место перечисление его конкретных видов, но словосочетание «иное военное имущество» свидетельствовало о возможности расширения данного перечня. Такая конструкция диспозиции ст. 251 УК РСФСР (1960) выделяла определенные виды военного имущества из общего массива. При этом непосредственное перечисление в ст. 251 УК РСФСР (1960) наиболее важных предметов военного имущества (оружия, боеприпасов, средств передвижения и военной техники) послужило основанием для предположения, что предметом преступлений против порядка сбережения военного имущества может быть лишь имущество, имеющее специально военное значение [10].

Законодательная «открытость» перечня военного имущества не давала оснований для подобно сужения предмета преступлений, предусмотренных ст. 251 УК РСФСР (1960), но различие в предназначении видов военного имущества обуславливало необходимость такого рода конкретизации.

Третья составляющая данного термина обозначена выражением «предмет». В словаре русского языка под предметом понимается «всякое материальное явление, вещь» [10]. Видимо, законодатель посредством включения в конструкцию норм данного термина стремился обеспечить уголовно-правовую защиту не только военной техники в целом, но и ее составных частей. Уничтожение, повреждение, утрата далеко не любой составляющей может отразиться на качестве функционирования комплекса в целом. Поэтому только функционально значимые составляющие военной техники необходимо рассматривать в качестве предмета преступления.

Так, например, А.А. Тер-Акопов к предметам военной техники относил и составные части военной техники, не вмонтированные в соответствующий вид техники (например, прицелы, артиллерийский и танковые стволы, подствольники, затворы, замки орудий и т.п.).

Таким образом, по нашему мнению, под предметами военной техники, как предметами состава преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, следует понимать технические устройства, находящиеся на снабжении войск, которые непосредственно не предназначены для поражения живой силы противника и иных его военных объектов, но призваны обеспечивать ведение боевых действий с помощью присущих им качеств [например, приборы, используемые для управления боем (радиостанции, телеустановки, радиолокаторы, приборы ночного видения), либо специальные машины, обеспечивающие передвижение войск на поле боя, но не несущие на себе оружие (тягачи, автомобили, инженерно-мостовое оборудование и т.п.)], а также их составные части. Другая техника, состоящая на балансе и числящаяся по штату воинской части, должна пользоваться такой же уголовно-правовой защитой, как иные виды военного имущества.

По сравнению с ранее действовавшим УК РФ (1996) ограничил круг предметов военного имущества, уничтожение, повреждение или утрата которых влечет уголовную ответственность (оружие, боеприпасы или предметы военной техники).

Изучение судебной практики военных судов по уголовным делам данной категории показывает, что сложностей при определении понятия и видов оружия и боеприпасов у военных судов не возникало. При решении данных вопросов военные суды правильно руководствова-

лись положениями Федерального закона «Об оружии» [3], иных нормативных актов, регламентирующих обеспечение воинских формирований различными видами вооружений.

Между тем понятия *предметы военной техники*, а также *уничтожение*, *повреждение* и *утрата* этих предметов судами не всегда толковались одинаково. Так, например, при рассмотрении военным судом (войсковая часть 10706) дела в отношении матроса М. было установлено, что он проник в помещение боевого поста корабля и изъял из радиотехнического комплекса «Привод-В» 97 электронных плат с микросхемами, содержащими драгоценные металлы. После этого электронные платы М. были разрушены, а находившиеся в них микросхемы похищены. Эти действия наряду со ст. 158 УК РФ квалифицированы судом по ч. 2 ст. 346 УК РФ как умышленное повреждение всего радиотехнического комплекса, повлекшее тяжкие последствия.

В то же время при рассмотрении тем же военным судом уголовного дела в отношении матросов С. и Ц. аналогичные действия виновных, выразившиеся в изъятии из комплекса «Привод-В» 51 плат, их разрушении и похищении содержащихся в платах золотосодержащих микросхем, были расценены военным судом как умышленное уничтожение самих плат. Учитывая стоимость уничтоженного имущества, содеянное, как и в первом случае, наряду со ст. 158 УК РФ квалифицировано судом по ч. 2 ст. 346 УК РФ (по признаку причинения тяжких последствий) [11].

Таким образом, причинение при сходных обстоятельствах одного вида ущерба военному имуществу получило при рассмотрении двух уголовных дел одним и тем же военным судом разную правовую оценку.

Объективная сторона преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, выражается в уничтожении или повреждении оружия, боеприпасов или предметов военной техники.

Под уничтожением военного имущества понимается приведение его путем действия или бездействия в полную непригодность. Под полной непригодностью военного имущества понимается невозможность восстановления его целостности из сохранившихся фрагментов (например, путем взрыва был подорван бронетранспортер, а оставшиеся после взрыва его фрагменты не позволяют восстановить бронетранспортер).

По мнению А.Н. Комиссарова, поскольку степень разрушения имущества действием, направленным на его уничтожение, может быть различной, то в отдельных случаях уничтоженную вещь можно восстановить, но если затраты на ее восстановление превышают стоимость этой вещи, то это становится экономически нецелесообразным и потому предмет считается уничтоженным [11].

Помимо уничтожения, объективная сторона преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, выражается и в повреждении оружия, боеприпасов или предметов военной техники.

Преступления, предусмотренные ст. 346 УК РФ являются относительно воинскими, т.е. имеют сходство с общеуголовными преступлениями (ст. 167, 168 УК РФ), но представляют повышенную опасность в условиях военной службы. Кроме того, термин «повреждение» используется в ряде других статей УК РФ (например, ст. 163, 178, 213, 215.2, 267 и др.). Поэтому при определении его содержания в преступлениях против военной службы необходимо учитывать общие подходы к содержанию данного понятия, представленные в науке уголовного права [12].

Исходя из этимологического значения термина «повреждение», представляется, что помешать, попрепятствовать использованию имущества можно любым способом, в том числе и посредством изъятия комплектующих деталей.

Под повреждением военного имущества понимается частичное его приведение в негодность для использования по прямому назначению, которое дает возможность его восстановления без существенных затрат.

Среди всего многообразия юридических определений понятия «повреждение» можно выделить наиболее значимые группы признаков, характеризующие его суть: во-первых, проти-

воправное воздействие на имущество; во-вторых, невозможность временно или частично использовать имущество по своему целевому назначению.

В своих определениях Военная коллегия Верховного Суда Российской Федерации неоднократно указывала, что по смыслу закона под повреждением военного имущества понимается приведение его в состояние временной непригодности к использованию по назначению при условии, что утраченные при этом свойства могут быть восстановлены и это восстановление (ремонт) экономически целесообразно. Таким образом, определяющим признаком повреждения военного имущества является его временная непригодность для использования по своему назначению.

Состав уничтожения или повреждения военного имущества (ст. 346 УК РФ) является материальным. Применительно к повреждению «деяние» характеризуется признаками первой группы, а «последствие» признаками второй группы. Иными словами, повреждение выступает в качестве «деяния-последствия».

В ст. 346 УК РФ способы воздействия при повреждении военного имущества не указываются. Поэтому представляется, что воздействие на военное имущество может быть любым физическим, химическим, механическим, в том числе и посредством изъятия комплектующих.

В некоторых случаях законодатель акцентирует внимание на способах воздействия, например в ч. 2 ст. 167 УК РФ выделены такие способы, как поджог, взрыв или иные общеопасные способы. Это обусловлено тем обстоятельством, что сами эти способы повреждения имущества существенно повышают общественную опасность преступления. Другие способы воздействия на имущество, как в ст. 167 УК РФ, так и в ст. 346 УК РФ, не влияют на характер общественной опасности преступления и для квалификации являются равнозначными.

По своему характеру воздействие на имущество может быть реализовано как разрушающими (удар, подрыв, поджог и т.д.), так и неразрушающими (разукомплектование, обесточивание, сбой программного обеспечения и т.д.) способами.

Изъятие отдельных заменяемых комплектующих изделий и составных частей, не повлекшее причинение физического вреда другим деталям и механизмам технического средства, не требующее его ремонта и не препятствующее использованию по назначению, повреждением военного имущества в смысле упомянутых уголовно-правовых норм не является. В свою очередь, уничтожение военного имущества предполагает его полное разрушение либо приведение в состояние, не позволяющее использовать это имущество по назначению, если оно не может быть восстановлено либо восстановление экономически нецелесообразно.

Воздействие на военное имущество при повреждении может быть реализовано любыми способами (разрушающими или неразрушающими), однако главным признаком, определяющим характер общественной опасности преступлений, предусмотренных ст. 346 УК РФ, являются последствия.

Общественная опасность преступлений против порядка сбережения военного имущества обусловлена прежде всего причинением организационного вреда, потерей боеспособности военной техники, боеспособности войск в отличие от общеуголовного преступления (ст. 167 УК РФ), где экономический ущерб обуславливает общественную опасность. Как аккуратное изъятие функционального блока, так и его «варварское» извлечение с разрушением других элементов технической системы, в равной мере приводящие к невозможности использовать военную технику по своему назначению (организационный вред), должны квалифицироваться по ст. 346 УК РФ. При этом способ изъятия детали зависит от ряда обстоятельств (конструкции военной техники, навыков виновного и т.д.) и влияет на порядок восстановления военного имущества, но для квалификации не имеет значения.

Субъектом преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, может быть любой военнослужащий, независимо от того, был ли вверен ему по службе предмет, который он уничтожил или повредил, или он случайно получил доступ к этому предмету, являлся ли уничтоженный или поврежденный предмет принадлежностью той воинской части (подраз-

деления), в которой проходил службу виновный, или принадлежность предмета ему была неизвестна.

Обязательным признаком объективной стороны преступления является наличие причинной связи между действием или бездействием и наступившим уничтожением или повреждением военного имущества.

Так, при действии с прямым умыслом и отсутствии разрыва во времени между деянием и наступившим последствием причинная связь является очевидной. Однако при наличии значительного разрыва во времени между действием и наступившим последствием в процесс уничтожения или повреждения военного имущества могут вторгаться и другие силы (природные явления, действия людей и т.п.), которые могли породить с неизбежностью уничтожение или повреждение военного имущества. В этом случае необходимо получить квалифицированное заключение специалиста о механизме воздействия различных сил на уничтоженное или поврежденное военное имущество, т.е. какая из них с неизбежностью причинила наступившие последствия, а какая выступала в качестве условия, способствовавшего реализации необходимой причины.

Субъективная сторона уничтожения и повреждения военного имущества в соответствии с прямым указанием в ст. 346 УК РФ характеризуется умыслом. Чаще всего это преступление совершается с прямым умыслом, т.е. лицо сознает общественную опасность способа, которым воздействует на военное имущество, предвидит, что военное имущество будет уничтожено или повреждено, и желает наступления этого последствия.

В качестве мотива уничтожения или повреждения военного имущества может быть: месть начальнику или сослуживцу, которые обязаны хранить это военное имущество; недовольство военной службой; уклонение от проводимых учебных занятий на время, пока не будет заменено уничтоженное военное имущество и т.п. Таким образом, мотив совершения преступления может быть любой, кроме оказания помощи иностранному государству во враждебной деятельности в ущерб внешней безопасности Российской Федерации. В этом случае объектом деятельности становится внешняя безопасность государства, а содеянное квалифицируется только как государственная измена (ст. 275 УК РФ).

Преступление совершается с косвенным умыслом в тех случаях, когда лицо, сознавая опасность своего действия, предвидя возможность уничтожения или повреждения военного имущества, хотя и не желает наступления таких последствий, но сознательно допускает их наступление либо относится к их наступлению безразлично. Такие случаи возникают при действии лица в состоянии алкогольного или наркотического опьянения, в процессе совершения хулиганских действий и в некоторых других случаях.

Уничтожение или повреждение военного имущества квалифицируется по ч. 2 ст. 346 УК РФ, если оно повлекло тяжкие последствия. Судебная практика признает тяжкими последствиями причинение крупного размера материального вреда уничтожением или повреждением военного имущества, уничтожением или повреждением уникальных предметов военного имущества, срыв важного боевого, учебно-боевого или хозяйственного мероприятия, сопряжение уничтожения и повреждения военного имущества с наступлением несчастных случаев с людьми, а также количеством уничтоженных единиц оружия, боеприпасов или предметов военной техники.

Тяжкие последствия, являющиеся квалифицирующим признаком состава умышленного уничтожения или повреждения военного имущества (ч. 2 ст. 346 УК РФ) и обязательным элементом основного состава аналогичных действий, совершенных по неосторожности (ст. 347 УК РФ), включают материальный и организационный вред, существенно влияющий на состояние боеспособности воинской части или подразделения. Они могут выражаться в причинении прямого материального ущерба, понесенного в результате уничтожения или повреждения военного имущества, в том числе связанного с расходами на ремонт, срыве выполнения боевой задачи, длительной утрате управления войсками и т.д. На характер и размер

вреда могут влиять также уникальность военно-технического средства, утрата технического приоритета и другие факторы.

В любом случае тяжесть наступивших последствий суду следует оценивать с учетом конкретных обстоятельств дела. При рассмотрении уголовных дел данной категории Военная коллегия Верховного Суда Российской Федерации неоднократно обращала внимание военных судов на то обстоятельство, что лицо, признанное виновным в хищении оружия, боеприпасов или предметов военной техники, дополнительной ответственности за их утрату, уничтожение или повреждение нести не может.

Между тем некоторыми военными судами допускались и ошибки. Так, военным судом Ленинградского военного округа Т. признан виновным в том, что с целью хищения автомата для последующей продажи во время несения службы в карауле пришел на пост к часовому Л. и ножом убил его. Завладев автоматом погибшего и боеприпасами к нему, Т. пришел на свой пост, где заранее приготовленной ножовкой отпилит у автомата приклад и распилит ствол до канала, после чего спрятал поврежденное оружие и боеприпасы на территории поста. В тот же день он был изобличен, а оружие и боеприпасы изъяты.

Действия Т. наряду с другими статьями УК РФ органы следствия и военный суд квалифицировали как хищение огнестрельного оружия и боеприпасов с применением насилия, опасного для жизни, и как умышленное уничтожение оружия. Рассмотрев дело, Военная коллегия Верховного Суда Российской Федерации не согласилась с такой квалификацией и пришла к выводу, что за умышленное уничтожение оружия Т. осужден необоснованно [13 - 16].

В соответствии с законом (прим.1 к ст. 158 УК РФ) под хищением понимается совершенное с корыстной целью противоправное безвозмездное изъятие и (или) обращение чужого имущества в пользу виновного или других лиц. Состав этого преступления включает в себя не только противоправное завладение, но и последующее пользование и распоряжение похищенным имуществом по своему усмотрению. Следовательно, лицо, совершившее хищение и повредившее либо уничтожившее предмет хищения, должно нести уголовную ответственность лишь по статьям УК РФ, предусматривающим ответственность за хищение. Никакой дополнительной ответственности за последующую судьбу похищенного имущества, в частности, за его утрату, повреждение и уничтожение на это лицо законом не возлагается. С учетом изложенного Военная коллегия Верховного Суда Российской Федерации приговор в этой части отменила и дело прекратила за отсутствием в действиях Т. состава преступления, предусмотренного ч. 1 ст. 346 УК РФ.

Таким образом, случаи, когда военнотружаший похищает военное имущество, являющееся предметом преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, и затем по разным причинам его уничтожает, образуют единое преступление против общественной безопасности. Например, рядовой А. похитил с пункта управления телевизор, а затем, предполагая, что телевизор, который он спрятал, может быть найден, а он изобличен в его хищении, уничтожил телевизор с помощью лома и выбросил на свалку.

Содеянное рядовым А. не образует совокупности преступлений в виде похищения чужого имущества (ч. 1 ст. 158 УК РФ) и умышленного уничтожения предметов военной техники, так как телевизор использовался на командном пункте (ч. 2 ст. 346 УК РФ). Поскольку кража предполагает незаконное обращение чужого имущества в свою собственность, постольку последующее обращение с этим имуществом похитителя состава нового преступления не образует. Если похититель продал это имущество, то в его действии состав преступления, предусмотренного ст. 175 УК РФ, отсутствует, точно так же отсутствует и состав уничтожения краденного имущества, если похититель его сам уничтожил.

Если субъект преступления преследовал цель уничтожить военное имущество, но по обстоятельствам, от него не зависящим, только повредил его, то содеянное не подлежит квалификации как покушение на уничтожение военного имущества (ч. 3 ст. 30 УК РФ и соответствующая часть ст. 346 УК РФ).

Статья 346 УК РФ уничтожение и повреждение военного имущества называет в качестве альтернативных признаков объективной стороны состава одного и того же преступления. Следовательно, для признания преступления, предусмотренного ст. 346 УК РФ, окончанным достаточно хотя бы одного из альтернативных признаков. Поэтому в вышеприведенном примере имеет место окончанный состав повреждения военного имущества.

Данным преступлением объективно причиняется вред, указанный в ч. 2 ст. 346 УК РФ. Однако характер общественной опасности данного вида преступления значительно ниже по сравнению с характером общественной опасности деяния, предусмотренного ч. 2 ст. 346 УК РФ. Такое различие в характере общественной опасности аналогичных по объективной стороне видов преступлений объясняется меньшей опасностью субъекта преступления, выражающейся в причинении того же вреда по неосторожности.

Вместе с тем из понятия «повлекшие тяжкие последствия» с точки зрения его этимологического содержания следует, что это понятие отражает последствия вторичного уровня, т.е. последствия, не входящие в факт уничтожения или повреждения военного имущества, а новые определяются сущностью и опасностью последствий, порожденных фактом уничтожения или повреждения военного имущества.

Таковыми последствиями являются: приостановление или прекращение выполнения боевого задания, военного обучения, снабжения воинской части всем необходимым для ее нормальной жизнедеятельности. Эти последствия более опасны, чем сам факт уничтожения или повреждения военного имущества, которое может быть восстановлено после удовлетворения гражданского иска, тогда как вторичные последствия трудно поддаются ликвидации, а иногда их ликвидировать вовсе невозможно. Это обстоятельство требует с большим вниманием относиться к анализу опасных вторичных последствий, а их содержание необходимо учитывать при определении тяжести вреда, нанесенного порядку несения военной службы, боеготовности и боеспособности войск, и определении вида и размера наказания, подлежащего применению к осужденному.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, ныне действующая редакция ст. 346 УК РФ не является препятствием для того, чтобы разукomплектование оружия, боеприпасов и предметов военной техники квалифицировать по данной статье. Однако судебная практика органов военной юстиции идет по пути ограничительного толкования термина «повреждения», исключая из перечня способов воздействия неразрушающие формы. При таком подходе правоприменителя деяния, обладающие общественной опасностью, остаются без адекватного уголовно-правового воздействия. Поэтому представляется необходимым внести изменения в ч. 1 ст. 346 УК РФ, указав в диспозиции статьи, помимо уничтожения и повреждения, на иные способы приведения в негодное для использования состояние оружия, боеприпасов и предметов военной техники, так как использование в УК РФ термина «иным способом» с определением последствия в виде приведения в негодное состояние военного имущества позволяет привлекать к уголовной ответственности не только за разукomплектование, но и за иные неразрушающие способы воздействия на военное имущество, изложив ч.1 ст.346 УК РФ в следующей редакции «Умышленные уничтожение, повреждение или приведение иным способом в негодное для использования состояние оружия, боеприпасов или предметов военной техники наказываются штрафом в размере до восьмидесяти тысяч рублей, или в размере заработной платы, или иного дохода осужденного за период до шести месяцев либо ограничением по военной службе на срок до двух лет, либо арестом на срок до трех месяцев, либо содержанием в дисциплинарной воинской части на срок до двух лет, либо лишением свободы на срок до двух лет».

**Список используемых источников**

1. Уголовное право Российской Федерации. Преступления против военной службы / отв. ред. Н.А. Петухов. – М.: ВУ, 2000. – С. 189.
2. Советское уголовное право. Воинские преступления: учебник / под ред. А.Г. Горного. – М., 1978. – С. 225.
3. Об оружии: федер. закон, 13 декабря 1996 г. № 150-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 1996. – № 51, ст. 5681.
4. О судебной практике по делам о хищении, вымогательстве и незаконном обороте оружия, боеприпасов, взрывчатых веществ и взрывных устройств: Постановление Пленума Верховного Суда Российской Федерации, 12 марта 2002. №5. Об относимости к предмету преступлений, предусмотренных ст. 346 УК РФ, видов оружия и боеприпасов, оборот которых не урегулирован Федеральным законом «Об оружии» // Бюллетень Верховного Суда Российской Федерации. – 2002. – №5;
5. *Шаранов С.Н.* Уголовная ответственность военнослужащих за нарушение правил обращения с оружием и предметами, представляющими повышенную опасность для окружающих (материалы для проведения занятий с судьями военных судов по специальной подготовке // Военно-уголовное право: вкладка 1-2 в журнал «Право в Вооруженных Силах». – 2003. – С. 56.
6. О военно-техническом сотрудничестве Российской Федерации с иностранными государствами: федер. закон, 19 июля 1998. № 114-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 1998. – № 30, ст. 3610;
7. Об утверждении перечня сведений, отнесенных к государственной тайне: указ Президента Российской Федерации, 30 ноября 1995. №1203 // Там же. – 1995. – № 49, ст. 4775.
8. О военно-техническом сотрудничестве Российской Федерации с иностранными государствами: федер. закон, 19 июля 1998. № 114-ФЗ // Там же. – 1998. – №30, ст. 3610.
9. *Ахметшин Х.М.* Вопросы практики применения закона об уголовной ответственности за воинские преступления: учеб. пособие. – М., 1968. – С. 50–53.
10. Словарь русского языка / под ред. С.И. Ожегова. – М., 1981. – С. 514.
11. Обзоры судебной практики военных судов Российской Федерации по уголовным делам (1996–2001 гг.) / под ред. Н.А. Петухова и А.Т. Уколова. – М., 2002. – С. 79–84.
12. Уголовное право Российской Федерации. Особенная часть: учебник / под ред. Б.В. Здравомыслова. – М., 1996. – С. 523–524.
13. *Волков Б.С.* Ответственность за уничтожение и повреждение имущества по советскому уголовному праву. – Казань, 1961.
14. *Кольшикина В.Ф.* Уголовная ответственность за уничтожение и повреждение имущества: дисс. ... канд. юрид. наук: 12.00.08 / Кольшикина Валентина Федоровна. – М., 1976.
15. *Шаньгин Ю.М.* Ответственность за уничтожение или повреждение государственного или общественного имущества по советскому уголовному праву: дисс. ... канд. юрид. наук: 12.00.08 / Шаньгин Юрий Михайлович. – Харьков, 1972.
16. *Никитина Е.В.* Уголовная ответственность за умышленное уничтожение или повреждение имущества: дисс... канд. юрид. наук: 12.00.08 / Никитина Екатерина Валерьевна. – Ростов/н/Д., 2000.



Arhangelsky A.A. Association of mathematical models of heterogeneous processes based on quaternions // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 6–8.

The article describes the formation of association mathematical models on heterogeneous processes received as integral transforms using the expansion operation of a complex variable.

*Key words:* mathematical model, the integral transformation, complex variable, quaternion.

Kalinichenko S.V., Makhrov K.B., Skorohodov Y.A. Methods and results of experimental studies with the using the onboard special equipment aviation maquette for receiving and processing the automatic identification system signals // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 9–17.

The article presents the analysis results of experimental studies using the onboard special equipment aviation maquette. The main tasks of the experiment were the testing of modern technologies for radio signals reception, recording and processing and verification of the functioning model of the sea-going vessels automatic identification space system.

*Key words:* automatic identification system, information processing, simulation modeling, experimental research.

The numerical analyses of queuing system with «cooling» and hyperexponential incoming flow / P.V. Korchagin, A.N. Lebedev, V.A. Lokhvitsky, A.V. Ulanov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 18–24.

The multichannel queueing system with "cooling" is considered. Cooling is understood as the temporary delays coming after the period of continuous employment. Markov chain of this queueing system for hyperexponential incoming flow, exponential service and cooling time distributions is shown. The stationary distribution of number of customers and Laplace-Stieltjes transformation of a waiting time are received.

*Key words:* queueing systems with cooling; non-markovian queueing systems; hyperexponential distribution; numerical methods.

Alferov A.V., Komrakov D.N., Skvasnikov M.A. Algorithm for estimating the composition of orbital and airborne remote sensing systems grouping in the problem of surveying an area object // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 25–34.

The article explores the possibilities and conditions for the joint application of space and unmanned aerial vehicles for solving applied problems of surveying area objects. The models of an area object and optical-electronic means of remote sensing are present. An algorithm for estimating the composition of a grouping of aerospace means for remote sensing in a joint use is propose.

*Key words:* remote sensing, spacecraft, unmanned aerial vehicle.

Berezhnoy I.V., Ereemeev I.Y., Makovsky V.N. Method for estimating of the indicator of organization in the tasks of monitoring military technical systems // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 35–45.

The search for new approaches to the solution of tasks of monitoring mobile objects in the tasks of monitoring military technical systems was initiated by revealing the facts of instability and inconsistency in assessing the state of dynamic objects on the basis of statistical information. To solve applied problems on the radio control of mobile (dynamic) objects, generalization and analysis of existing approaches is required to form the basis for the development of a scientific and methodical apparatus for recognizing the states of complex dynamic objects under conditions of a priori uncertainty with respect to the parameters of their functioning.

*Key words:* orderness, dynamic objects, communication systems and data transmission with dynamic topology of a network.

Illarionov B.V., Maliyev D.S. The possibility of recognizing the emissions of simultaneously observed relay satellites // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 46–54.

The results of simulation of the procedures for recognizing the emissions of simultaneously observed transponder satellites at various trajectories of their drift around the sub-satellite point in the geostationary orbit are presented, and quantitative estimates of the recognition quality are obtained.

*Key words: radio control, satellite connection, recognition of emissions.*

The physical-statistical model of the wind in the cyclone based on the Earth remote sensing from space data / A.V. Kostromitinov, A.A. Korystin, A.B. Lebedev, P.A. Prokhorenko, M.A. Tyuleneva // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 55–62.

The physical-statistical model of the wind in the cyclone based on the Earth remote sensing from space data is described in the article. The model is constructed on identified dependence of the wind field on the cloud field in the cyclone and the using of data from national hydrometeorological spacecraft. The Earth remote sensing data is considered trustworthy by default. The using of the developed model together with the geostrophic model and objective analysis of the geopotential field by spline-approximation method allows to get reliable geopotential field over areas not covered by hydrometeorological observations.

*Key words: physical-statistical model, reliability of the hydrometeorological information, hydrometeorological spacecraft, geopotential field, cloud field in the cyclone, wind field in the cyclone.*

Lupanchuk V.Y. Development of methods of navigation cartography in problems of determination of the current position of robotic engineering complexes in the space // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 63–72.

The article deals with the development of methods of navigational mapping based on the creation of a high-precision local area of the earth's surface with navigation and geodetic parameters for solving the problems of positioning mobile robotic complexes in the surrounding space. Local areas can be represented in the form of high-precision geospatial information of reference models based on the application of cartographic data and instrumental measurements at special points of the selected site.

*Key words: robotic complex, local area of the earth's surface, cartographic data, instrumental data, correlation, reference model.*

Abdurahimov A.A., Bartsevich A.V., Karev M.S. The technique of estimation of quality of the motion control system of a spacecraft observations, functioning in terms of external destructive influences // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 73–82.

In the article the questions of modeling of the functioning of the spacecraft observations by the method of statistical simulation. The choice of indicators of the quality of the motion control system of the SPACECRAFT and the method of its evaluation on the results of the operation space of the device, functioning in terms of external destructive influences.

*Key words: spacecraft; surveillance; traffic control system; the destructive influence of the; angular position.*

Absaljamov D.R., Marchenko M.A., Chapovalov D.V. Energy and resource savings in operating a system ensuring temperature and humidity conditions in powerful container radar stations based

on controlling the structural diagram of a cold supply system // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 83–89.

An approach of saving energy resources in operating refrigerating machines of systems ensuring temperature and humidity conditions due to the use of a variable structure of the element base of a cold supply system depending on a load is suggested. The technical and economic indicators of refrigerating machines characterizing their operation when changing over to the use of a variable structure are reviewed. Regression models characterizing the dependency of technical and economic indicators of the refrigerating machines on their load in sequential and parallel connection schemes are presented. A comparative analysis of operating characteristics of refrigerating machines in various connection schemes is given.

*Key words: refrigerating machine, structural scheme of a cold supply system, energy efficiency.*

Averkiev N.F., Salov V.V., Khasanov A.Y. The characteristic velocity of a spacecraft to perform a maneuver to change the frequency of the track circuit // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 90–97.

The article presents the algorithm for calculation of characteristic spacecraft velocity needs to maneuver from original to new working quasisynchronous orbit. This maneuver can be caused by the necessity of observation of a new area or exit of spacecraft in backup orbit. We propose a method for determining of parameters of a new working quasisynchronous orbit, that satisfy customer requirements for frequency of observation of a given area and characteristic velocity.

*Key words: spacecraft, quasisynchronous orbit, Earth remote sensing, characteristic velocity.*

Avseenko A.I., Dorofeev S.A., Kivchun O.R. Conceptual model of control of electrical energy consumption based upon assessment of the energy-saving potential considering dynamics of factors that influence electrical energy consumption // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 98–104.

The model of control of electrical energy consumption, which is based upon assessment of the energy-saving potential considering dynamics of changes of electrical energy consumption and factors that influence it, is assessed at this article. This approach firstly introduces the concept of dynamic characteristics of energy-saving potential and examines the three-tier system of assessment of energy-saving potential based upon key factors that influence electrical energy consumption.

*Key words: energy-saving potential, dynamic characteristics of energy-saving potential, confidence interval, ZP-rationing, ZP-norms of electrical energy.*

Approximation of the program of the pitch angle of ballistic missiles in flight, with the given final conditions / S.A. Belyaev, Y.V. Mironov, Y.B. Ostapchenko, A.V. Ekalo // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 105–109.

Discussed the creation of educational software for modeling of ballistic missiles, the approximation method of determination of the pitch program, which provides a contact point with the specified coordinates and specified angle of entry into the atmosphere. Input data are a test of the motion parameters of ballistic missiles in flight at a fixed distance. These settings are approximated to specific parts of polynomials of various degrees. Arbitrarily set to a limited timeframe the final flight conditions are provided by choosing appropriate coefficients of the polynomials in pitch angle and calculating the required azimuth of the start-up. The approach is acceptable for training and simulation complexes that do not require high precision calculations.

*Key words: approximation, modeling system, the program pitch.*

Vilkov A.V., Kolesov D.G., Naydanov A.F. Scientific substantiation of the technical character of the system of radiation monitoring position area // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 110–116.

The article presents a methodical approach, allowing to prove the technical configuration of the system of radiation monitoring position area based on the theory of the effectiveness of military technical systems. The assessment of performance indicators for different options for building a system of radiation monitoring position area.

*Key words: military technical system, the reliability, efficiency, completeness, radiation monitoring, system, the effectiveness.*

Evaluation of reliability and economic efficiency of gasified boiler installations / A.S. Glukhakov, E.I. Zhabrovets, V.M. Motorin, V.V. Pudikov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 117–121.

This article proposes an approach to assessing the reliability and economic efficiency of gasified boiler plants in order to obtain quantitative estimates of these important properties.

*Key words: boiler installations, reliability, reliability, latent failures, maintenance, system of complex automation, heating season, economic efficiency.*

Method definition change of angular velocity of spacecraft and overloading with space debris collision / P.S. Goncharov, A.M. Denisov, L.P. Zozulia, I.S. Prohvatova // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 122–129.

Calculation variant for change of angular velocity of spacecraft and overload shock at a single point on surface the spacecraft from collision with space debris is shown.

*Key words: space debris, impact momentum, angular velocity, spacecraft, overload.*

Maximum parameter rating of the maneuver of bringing the space tether system in the mode of rotation / L.K. Gorshkov, A.M. Denisov, O.N. Mishcheriakova, V.I. Scherbakov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 130–139.

The task of the optimal speed control of the power cable sampling to transfer space tether system from the regime of librational fluctuations into the rotational mode of operational is stated. The approximate integrals of the general solution as a function of the boundary conditions are obtained. On their basis the maneuver parameters have been estimated. The maneuver parameters estimated on their basis are given.

*Key words: space tether system (TS), maneuver, librational vibrations, rotation, optimal control, the parameters of the maneuver.*

Grachov I.G., Dema I.A., Nizovtsev V.M. Numerical modeling of processes flow past the heated gas ohazhdaemyh element of design of jetengines of aircrafts // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 140–147.

Considered wrapping concave surface of the turbine blade turbine aircraft engine, which has a small curvature, high-temperature high-speed subsonic flow of a viscous heat-conducting gas in the conditions of local blowing cooling gas from the cavity of the rotor blade in the flow interscapulum turbine. Performed theoretical studies. For the integration of the Navier-Stokes equations describing the flow of a viscous gas, used the method of finite differences. The results of the numerical investigation of the influence of velocity and temperature of the blown gas, and also the Mach number  $M_\infty$  main hot gas stream velocity distribution in the flow, pressure and voltage variation along the friction surface structure on the fields of temperature and density in the surface layer. It is shown that for certain values of the flow parameters and the blown gas on the surface of the blade, an additional area of high pressure. The result is increased by 1.5-2.5 times the transverse force applied to the blade, and the torque on the turbine shaft. This will increase the capacity of the turbine or fuel consumption.

*Key words: jetengine, turbine, aircraft, gas flow, numerical modeling.*

Dashkin E.R. Complex mathematical model of the process of registration of images of space appliances in matrix appliances with charged communication // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 148–155.

A new complex mathematical model for the signals of comic devices processed in optoelectronic special purpose systems is proposed, which differs from the known signal models in that it takes into account the procedure for reading images from an optical receiver in the form of a charge-coupled array device that distorts the original image.

*Key words: space object signal model, matrix photodetector, optical receiver noise, optical image processing.*

Bartsevich A.V., Dashkin E.R., Poljakov V.V. Implementation of the method for detecting signals of objects in the optical-electronic system in parametric priority uncertainty // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 156–163.

He possibility of practical implementation of the previously proposed method for detecting target signals (elements of «space debris») in an optoelectronic system under real operating conditions, and, for parametric a priori uncertainty of statistical characteristics of processed signals and unclassified training samples, is considered. Examples of the operation of individual algorithms are given.

*Key words: near-earth space, man-made objects, «space debris», optoelectronic complex, signal detection, parametric a priori uncertainty, statistical characteristics.*

The model of energystream from solar panels on-board power supply system of rotation stabilization spacecraft / D.L. Kargu, N.V. Radionov, G.B. Steganov, Y.A. Chudnovsky, D.A. Shubin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 164–171.

In this article the model of energystream from solar panels to the on-board power supply system of rotation stabilization spacecraft. The model allows to assess the thread parameters according to the output power of the solar battery of the rotational frequency of the spacecraft body around its axis, as well as changes of illumination of solar panels under conditions of partial shading design elements and the body of spacecraft. The considered model allows us to solve the problem of choosing the optimal software mix of onboard power supply system.

*Key words: spacecraft, onboard power supply system, solar battery, photo electric transducer, stabilization by rotation.*

Petuhov A.B., Sergeev V.A. The method of estimating the parameters of the star sensors of space vehicles // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 172–178.

The proposed method of estimating parameters can be used in the process of operation of spacecrafts when there is no high-precision ground equipment and the possibility of a large amount of the number of measurements in order to obtain reliable estimates of accuracy parameters of star sensors. Enter the indicator of efficiency of functioning of the devices star orientation. In the result of using this method reduces the number of required measurements, time estimation of the parameters of star sensors of a spacecrafts and increases the accuracy of decisions on the conformity of parameters of the device to the specified requirements.

*Key words: the spacecraft, orientation, accuracy, efficiency of functioning, estimate of probability, star sensor*

Altukhov A.I., Kalinin V.N., Kovnatsky V.K. Expert method for evaluating the level of professional competences learning on the implementation of laboratory practices on physics physicist // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 179–183.

The article proposes a method for measuring the level of professional competencies of students in the performance of laboratory practical work in physics, based on one of the methods of system analysis - expert quantification of the results of solving individual problems with the use of the corresponding coefficients of relative importance. As an example, a laboratory workshop on electro-dynamics was considered.

*Key words: professional competence, pedagogical measurement, laboratory practice, system analysis, expert method, quantification, coefficients of relative importance, educational-laboratory complex.*

Bashkircev V.P., Kasavtsev M.Y. Methods of forming of leadership qualities of servicemen in the conditions of daily activities physicist // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 184–193.

The article presents the results of a study of the quality of leadership skills of future military specialists. Actualized the problem of forming of leadership qualities of soldiers in the daily activities of the unit. For the pedagogical management of process of for leadership qualities in the most important competence of the commander, the authors have developed a technique of its formation to the students in terms of the daily work of the military.

*Key words: daily activities, leadership abilities, military personnel, methods of formation of leadership qualities of soldiers.*

Borovikov I.G., Shcherbina I.S. Modeling of the process development of educational material the personnel of the combat crew parts of space launch vehicles // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 194–201.

The article discusses the issue of modeling the process of development of educational material to personnel, operating space-rocket complexes. The relevance of the topic is determined by the necessity of training using computer training tools and a lack of models enabling to estimate the duration of the learning process. The authors suggested a description of the training process using the theory of Markov chains. The results of modeling of a fragment of the training course for the training of combat crew parts of space launch vehicles using computer training tools.

*Key words: computer training tool, computer training, adaptive learning, Markov chain, modeling the learning process.*

Bulekbaev D.A., Morozov A.V. Formation and development of skills of computing experiment for training on the example research of the dynamic system. // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 202–209.

The computer allows not only carry out calculations with a high degree of accuracy, but also to comprehensively explore complex nonlinear mathematical models using a number of purposeful computational experiments. Code sharing of qualitative methods of the theory of differential equations and modern packages of applied programs allows to conduct researches of complex models of real objects with maximum efficiency. In this paper we present, on the basis of such a qualitatively-numerical analysis, the result of the scientific research of the Duffing-Van der Pol equation. It is a generalized model of the classical self-oscillator.

*Key words: dynamical system on a plane, phase space, equilibrium position, limit cycle, homoclinic trajectory, modeling of dynamic systems on a PC.*

The training complex for education development and exploitation of information and communication space-purpose facilities specialists / E.A. Novikov, D.A. Sevastyanov, I.S. Toporkov, A.S. Fadeev, K.Y. Tsvetkov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 210–218.

The article describes actual issues of development of the training complex for education development and exploitation information and communication space-purpose facilities specialists. The approach to

solving the problem of complex use of educational programs and information, educational, training facilities is formulated. Methods and technologies of teaching in conducting various types of training in the systems of higher, secondary and additional vocational education are considered. Implementation of the training complex for education in practice of development and exploitation of information and communication space-purpose facilities specialists, allowed to ensure the requirements of The federal educational standard of the Russian Federation (3++).

*Key words: information and communication space-purpose facilities, professional competence, training complex for education, training facility for education, information facilities for education, methods and technologies of teaching.*

Osipov G.K., Hilenko V.V. Methods of developing tests for the assessment of formation of professional competence of students of higher military educational institutions // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 219–231.

Set out the essence of the methods of developing tests for the assessment of formation of professional competence of students of higher military educational institutions. It is considered the main blocks, including the formation of expert groups, selection of diagnostic material, design, dough-out of tasks, assessment of informativeness of test items and the test as a whole. Results of approbation of the technique at the Department of cartography of the military space Academy named A. F. Mozhaysky on the example of creation of tests for the discipline «geoinformational cartografianie».

*Key words: test task, the test, the expert group, assessment of competence of experts, matrix of competences, soft rating assessment, diagnostic and differentiating ability of the test task.*

Steshov A.V. Metamodel of pedagogical speech communication // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 232–239.

In the article the graphical metamodel of pedagogical speech communication is substantiated, the structure and the content of communicative competence of university lecturer is revealed.

*Key words: metamodel, speech communication, rhetorical aspect, communicative competence.*

Gytorovich O.V. The problem of man in science and a man of science. The 110th anniversary of S. P. Korolev dedicated // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 240–250.

The author of the article draws reader's attention to the problem of a man in science, represented not only as changing of attitude to the man the Creator during the development of science of science, but the conditionality of different approaches to the problem as the dynamic of the science itself as well. Much attention is given to the factors and conditions facilitating the forming of a creative personality, that is not incidental, as this subject was always was attendant and described in philosophy in conjunction with the man in science. The article highlights the fact story of the academician S. P. Korolev to show essential role, that personality of a concrete person can perform in the history of science.

*Key words: science, man the Creator, scientific work, scientific community, space, applied astronautics.*

Kazakova I.B. Criminal and lawful characteristic of the intentional destruction or damage of the military service men // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2017. – Release 659. – P. 251–260.

The author notes that the problem of the intentional destruction or damage of the military stores by military service men is especially urgent now. It is connected first of all with the receipt of modern weapon and military equipment to the Russian Armed Forces.

In the article deep lawful analyses of the Criminal Code Clauses considering crimes against military service is carried out. The characteristic of the crime in the form of intentional destruction or

damage of the military stores by military service men is given. Indications and corpus delicti in the form of international destruction or damage of the military stores are completely discovered. Special attention is devoted to the explanation of the concept «things of military equipment» as the object of corpus delicti. On the basis of the deep theoretical knowledge and wide legal practice the author has formulated suggestions for the change of p.1 cl. 346 of the Criminal Code of Russian Federation.

*Key words: military service men, military stores, Criminal Code of Russian Federation, weapon, military equipment, things of military equipment.*



**Абдурахимов Алексей Александрович**, начальник 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mail.ru

**Абсалямов Дамир Расимович**, профессор 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (911) 244-33-13, e-mail: damir73@yandex.ru

**Аверкиев Николай Фёдорович**, профессор 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: averkiev@mail.ru

**Авсеенко Александр Иванович**, начальник 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 752-29-59, e-mail: avseenko@mail.ru

**Алтухов Александр Иванович**, заведующий 112-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: aai\_51@mail.ru

**Алфёров Александр Викторович**, командир войсковой части 96434 (188660, Россия, Ленинградская обл., Всеволожский р-н, п. Бугры, ул. Шоссейная, 16А); тел.: 8 (812) 294-95-40.

**Архангельский Алексей Алексеевич**, старший научный сотрудник 574-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 37); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 792-92-55.

**Барцевич Андрей Вадимович**, доцент 81-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (911) 035-48-06.

**Башкирцев Виктор Павлович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат педагогических наук, доцент.

**Беляев Сергей Алексеевич**, советник заместителя генерального директора по развитию АО «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера О); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 703-75-83, e-mail: beliaev@nicetu.spb.ru

**Бережной Игорь Владимирович**, доцент 55-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-54, e-mail: berezhnoy-igor@yandex.ru.

**Боровиков Иван Геннадьевич**, адъюнкт 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-35, e-mail: ivan\_borovikov@icloud.com

**Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович**, заведующий 111-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: atiman@mail.ru

**Вилков Алексей Владимирович**, адъюнкт 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93.

**Глуханов Александр Сергеевич**, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-65-45, e-mail: vka@mail.ru

**Гончаров Павел Сергеевич**, начальник 12-го отдела (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mail.ru

**Горшков Лев Капитонович**, профессор 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 694-33-86, e-mail: manev@mail.ru

**Грачёв Игорь Григорьевич**, доцент 13-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-13.

**Гуторович Ольга Викторовна**, доцент 107-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук; тел.: 8 (911) 841-69-19; e-mail: olwikgut@yandex.ru

**Дашкин Эдуард Романович**, старший преподаватель 82-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (905) 214-32-86, e-mail: edidash@mail.ru

**Денисов Андрей Михайлович**, начальник 11-го отдела (научно-исследовательского) – заместитель начальника 1-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 212-13-89, e-mail: dam154@mail.ru

**Дёма Игорь Анатольевич**, научный сотрудник 172-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-13.

**Дорофеев Сергей Алексеевич**, начальник 512-й кафедры филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде (236036, Россия, Калининград, Советский пр-т, 82); кандидат технических наук; тел.: 8 (4012) 50-23-84, e-mail: dorofeev1973@mail.ru

**Еремеев Игорь Юрьевич**, начальник 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57, e-mail: eremeev-igor@yandex.ru

**Жабровец Евгений Игоревич**, курсовой офицер – преподаватель факультета среднего профессионального образования Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-65-45, e-mail: vka@mail.ru

**Зозуля Людмила Петровна**, старший научный сотрудник 122-й лаборатории (научно-исследовательской) 12-го отдела (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

**Илларионов Борис Владимирович**, профессор 204-й кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394029, Россия, Воронеж, ул. Набережная Авиастроителей, 28); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (473) 244-78-25, e-mail: vaiu@mil.ru

**Казакова Илона Борисовна**, заместитель руководителя Следственного отдела по городу Балашихе Главного следственного управления Следственного комитета России по Московской области (143900, Россия, Московская область, г. Балашиха, ул. Свердлова, 15/3); тел.: 8(968) 400-01-19, e-mail: edviga@mail.ru

**Калинин Владимир Николаевич**, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-08, e-mail: kvn.112@mail.ru

**Калиниченко Сергей Владимирович**, заместитель начальника 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-25.

**Каргу Дмитрий Леонидович**, начальник 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22 e-mail: dmitrii\_kargu@mail.ru

**Карев Михаил Сергеевич**, адъюнкт 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: m.karefff@yandex.ru

**Касавцев Михаил Юрьевич**, старший преподаватель 102-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: mk-spb@rambler.ru

**Кивчун Олег Романович**, старший преподаватель 512-й кафедры филиала ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде (236036, Россия, Калининград, Советский пр-т, 82); кандидат технических наук; тел.: 8 (4012) 50-23-84, e-mail: oleg\_kivchun@mail.ru

**Ковнацкий Валерий Константинович**, доцент 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-72.

**Колесов Дмитрий Геннадьевич**, заместитель начальника 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук; тел.: 8 (812) 347-96-93.

**Комраков Дмитрий Николаевич**, начальник учебной лаборатории 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-51.

**Корчагин Павел Викторович**, старший преподаватель 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-25, e-mail: pavel.v.korchagin@gmail.com

**Корыстин Александр Александрович**, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 346-96-52.

**Костромитинов Алексей Валерьевич**, инженер 511-й лаборатории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 346-96-52.

**Лебедев Алексей Николаевич**, начальник 273-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) – старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-92, e-mail: lebedev.a.n@yandex.ru

**Лебедев Андрей Борисович**, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 346-96-52.

**Лохвицкий Владимир Александрович**, докторант 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-25, e-mail: lokhv\_va@mail.ru

**Лупанчук Владимир Юрьевич**, преподаватель 34-й кафедры Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (143900, Россия, Московская область, г. Балашиха, ул. Карбышева, 8); кандидат технических наук; тел.: +7 (915) 343-48-26, e-mail: raketofflu@mail.ru

**Маковский Вячеслав Николаевич**, доцент 101-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-53, e-mail: makovskiy-vyacheslav@yandex.ru

**Малиев Дмитрий Сергеевич**, адъюнкт 204-й кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394052, Россия, Воронеж, ул. Маршала Неделина, 27б); тел.: 8 (910) 281-07-01, e-mail: dmaliev@mail.ru

**Марченко Михаил Андреевич**, старший преподаватель 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-57.

**Махров Константин Борисович**, начальник отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 347-97-59.

**Миронов Юрий Вячеславович**, ведущий специалист АО «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера О); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 703-75-83, e-mail: mironov.yuriy@nicetu.spb.ru

**Мищерякова Оксана Николаевна**, преподаватель 114-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 853-94-86, e-mail: vka114@mail.ru

**Морозов Алексей Валентинович**, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат физико-математических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-31, e-mail: Alex.Morozof@gmail.com

**Моторин Виктор Михайлович**, доцент 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-65-45, e-mail: vka@mail.ru

**Найданов Александр Фотеевич**, доцент 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-93.

**Низовцев Владимир Михайлович**, старший научный сотрудник 112-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-13.

**Новиков Евгений Александрович**, доцент 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 218-51-19, e-mail: novikov.ev.galex@yandex.ru

**Осипов Георгий Константинович**, профессор 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор географических наук, профессор; тел.: 8 (812) 694-82-12, e-mail: Osipov-G-K-2005@yandex.ru

**Остапченко Юрий Борисович**, заместитель генерального директора по развитию АО «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера О); тел.: 8 (812) 703-75-83, e-mail: ou@nicetu.spb.ru

**Петухов Андрей Борисович**, преподаватель 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 790-94-39, e-mail: andrey\_11\_75@mail.ru

**Поляков Виталий Викторович**, доцент 71-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 256-85-94.

**Прохватова Ирина Станиславовна**, младший научный сотрудник 122-й лаборатории (научно-исследовательской) 12-го отдела (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

**Прохоренко Павел Александрович**, начальник лаборатории – старший научный сотрудник 323-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-74.

**Пудиков Вячеслав Валентинович**, старший преподаватель 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-65-45, e-mail: vka@mail.ru

**Радионов Николай Васильевич**, профессор 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор экономических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: radionov\_nv@mail.ru

**Салов Вячеслав Викторович**, начальник 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: slava260975@mail.ru

**Севастьянов Дмитрий Анатольевич**, директор департамента телекоммуникационных, измерительных и геофизических систем и комплексов федерального государственного унитарного предприятия «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» (107996, Россия, Москва, ул. Щепкина, 42, стр. 1, 2); кандидат технических наук; тел.: 8 (495) 631-82-89, e-mail: sda@roscosmos.ru

**Сергеев Виктор Александрович**, доцент 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (904) 514-10-15, e-mail: sergeev\_vka@mail.ru

**Сквazников Михаил Алексеевич**, начальник 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-51.

**Скорыходов Ярослав Анатольевич**, начальник лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 347-97-59, e-mail: yaroslavskor@gmail.ru

**Стеганов Геннадий Борисович**, доцент 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: sgb-22kaf@yandex.ru

**Стешов Анатолий Валентинович**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-97-62, e-mail: mashasteshova@mail.ru

**Топорков Игорь Святославович**, заместитель командующего космическими войсками по вооружению – начальник службы вооружения (космических войск) командования космических войск Главного командования Воздушно-космических сил Министерства обороны Российской Федерации; кандидат технических наук.

**Тюленева Марина Анатольевна**, мастер производственного обучения учебно-производственной мастерской Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-74.

**Уланов Александр Викторович**, старший научный сотрудник 271-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-97-92, e-mail: ulanov246@rambler.ru

**Фадеев Александр Сергеевич**, генеральный директор публичного акционерного общества Центральное научно-производственное объединение «Каскад» (125047, Россия, Москва, ул. 1-я Брестская, 35, стр. 1); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (499) 251-69-66.

**Хасанов Антон Юрьевич**, курсовой офицер-преподаватель 1-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-16, e-mail: kh.www@yandex.ru

**Хиленко Владислав Вячеславович**, начальник 72-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-71.

**Цветков Кирилл Юрьевич**, начальник 35-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 947-19-58, e-mail: wavelet3@mail.ru

**Чудновский Юрий Анатольевич**, доцент 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: chudnovsky\_yuri@mail.ru

**Шаповалов Дмитрий Викторович**, соискатель 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-57.

**Шубин Денис Александрович**, адъюнкт 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: den\_shubin@bk.ru

**Щербаков Валерий Иванович**, заведующий 114-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-89, e-mail: vka114@mail.ru.

**Щербина Игорь Сергеевич**, начальник 103-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-96-57, e-mail: ispytatel1997@mail.ru

**Экало Александр Владимирович**, генеральный конструктор АО «Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера О); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 703-75-83, e-mail: ekalo@nicetu.spb.ru

**Авсеенко Александр Иванович**, начальник 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (921) 752-29-59, e-mail: avseenko@mail.ru

**Авсюкевич Дмитрий Алексеевич**, профессор 44-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

**Алексеев Виктор Фёдорович**, старший научный сотрудник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (911) 217-03-39.

**Басыров Александр Геннадьевич**, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (911) 248-57-80, e-mail: alexanderbas@mail.ru

**Блажко Александр Кириллович**, старший преподаватель 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-27.

**Богачёв Сергей Алексеевич**, доцент 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-16.

**Волков Валерий Фёдорович**, профессор 91-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор военных наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-64.

**Гера Василий Иосифович**, начальник 4-го факультета Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-40.

**Гильванов Павел Ринатович**, начальник 104-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-93.

**Григорьев Андрей Николаевич**, доцент 51-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-96-51.

**Доронин Александр Павлович**, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент.

**Еремеев Игорь Юрьевич**, начальник 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57, e-mail: eremeev-igor@yandex.ru



**Замарин Александр Иванович**, профессор 53-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-57.

**Калинин Владимир Николаевич**, профессор 112-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-96-72, e-mail: kvn.112@mail.ru

**Кубасов Игорь Юрьевич**, старший преподаватель 16-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-99-16.

**Кужекин Николай Сергеевич**, профессор 109-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат философских наук, профессор; тел.: 8 (911) 794-16-72.

**Кузьмичев Юрий Алексеевич**, доцент 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-21.

**Кунтурова Надежда Борисовна**, профессор 111-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор педагогических наук, доцент; тел.: 8 (921) 753-04-88.

**Огородников Владимир Петрович**, профессор 107-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор философских наук, профессор.

**Павлов Александр Николаевич**, доцент 94-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-62.

**Рыжиков Юрий Иванович**, профессор 27-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.: 8 (812) 347-95-27, e-mail: ruzhbox@yandex.ru

**Садин Дмитрий Викторович**, профессор 11-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: sadin@yandex.ru

**Сеньченков Валентин Иванович**, профессор 43-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

**Стеганов Геннадий Борисович**, доцент 22-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: sgb-22kaf@yandex.ru

**Трофимов Илья Анатольевич**, старший преподаватель 25-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-27.

**Фоминов Иван Вячеславович**, начальник 21-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: 8 (812) 347-95-21.

**Щербаков Валерий Иванович**, заведующий 114-й кафедрой Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: 8 (812) 707-16-75, e-mail: vka114@mail.ru