

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

**Выпуск 692  
2024 г.**

Научное рецензируемое издание

Выходит с 1942 года

---

Издатель:

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

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского  
**доктор военных наук А. Н. Нестечук**

Члены редакционного совета:

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

Главный редактор:

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

Редколлегия:

- председатель **Ю. В. Кулешов**, доктор техн. наук, проф.;  
зам. председателя **И. В. Сахно**, доктор техн. наук, проф.;  
ответственный секретарь **А. Л. Федер**, доктор воен. наук, доц.;  
**Н. Ф. Аверкиев**, доктор техн. наук, проф.; **В. Ф. Алексеев**, доктор техн. наук, проф.;  
**Т. В. Алексеев**, доктор истор. наук, доц.; **А. П. Алёшкин**, доктор техн. наук, проф.;  
**В. Н. Арсеньев**, доктор техн. наук, проф.; **Д. Н. Бирюков**, доктор техн. наук, проф.;  
**И. А. Готюр**, доктор техн. наук, проф.; **А. П. Доронин**, доктор техн. наук, проф.;  
**И. Ю. Еремеев**, доктор техн. наук, проф.; **В. Н. Калинин**, доктор техн. наук, проф.;  
**Б. Д. Казахов**, доктор воен. наук, проф.; **В. В. Клейменов**, доктор техн. наук, проф.;  
**В. В. Козлов**, доктор техн. наук, проф.; **Н. С. Кужекин**, кандидат филос. наук, проф.;  
**В. Н. Кузьмин**, доктор воен. наук, проф.; **Н. Б. Кунгурова**, доктор пед. наук, доц.;  
**Е. Л. Лебедев**, доктор техн. наук, проф.; **А. Г. Ломако**, доктор техн. наук, проф.;  
**А. И. Лоскутов**, доктор техн. наук, проф.; **Г. Н. Мальцев**, доктор техн. наук, проф.;  
**Т. О. Мысливцев**, доктор техн. наук, проф.; **Е. А. Новиков**, доктор техн. наук, доц.;  
**А. Н. Павлов**, доктор техн. наук, проф.; **А. В. Паршуткин**, доктор техн. наук, проф.;  
**Н. А. Репях**, кандидат филос. наук, доц.; **А. М. Сычева**, доктор техн. наук, проф.;  
**И. В. Фоминов**, доктор техн. наук, проф.; **А. В. Чарушников**, доктор воен. наук, проф.

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

Ответственный за выпуск:  
редактор **А. В. Головина**  
Технический редактор  
и компьютерная верстка: **Е. Е. Лавриенко**  
Техническая поддержка:  
**К. И. Чувирова**

Адрес:  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;  
тел.: 8 (812) 347-97-05;  
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 25.09.2024.  
Формат печатного листа 320 × 450/2.  
Уч.-печ. л. 80,00. Уч.-изд. л. 39,50  
Тираж 26 экз. Заказ 4187/105.  
Отпечатано в типографии  
Военно-космической академии  
имени А. Ф. Можайского

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Багрецов С. А., Калуга В. М., Михалченков А. А., Уточкин О. В.* Моделирование совместной деятельности операторов в контекстно-свободных группах совместно-индивидуальной деятельности на основе игр на N-кубах и N-симплексах ..... 6
- Барина Н. А., Дулишкин Р. М., Касавцев М. Ю.* Модель и алгоритм оценивания профессионально-личностных качеств курсанта для специального программного обеспечения «Образование-МО» ..... 16
- Басыров А. Г., Факхро Ф.* Модель распределенного ресурсосберегающего информационного обмена в условиях априорной неопределенности качества информации ..... 24
- Казьмин Д. Ю., Пилькевич С. В.* Прогнозная модель негативных воздействий в условиях реализации мероприятий защиты информации ..... 33

### СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Бабушкин Е. А., Володин Р. С., Калашиников Р. В., Лаврентьев А. М.* Модель процесса пеленгования постановщиков активных помех со сверхразрешением в многофункциональных радиолокационных станциях с фазированной антенной решеткой проходного типа ..... 48
- Валишин М. Ш., Новиков Е. А., Рахимов Р. Р.* Методический подход к задаче распределения ресурса сети связи и передачи данных в интересах управления космическими аппаратами на основе системы уравнений Колмогорова-Чепмена в дифференциальной форме ..... 58
- Гарагуля А. С., Куликов В. С., Мальцев Г. Н.* Исследование помехоустойчивости радиоэлектронной системы группового управления космическими аппаратами в условиях внутрисистемных помех ..... 66

### СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Алехин С. Г., Иванов Р. Д.* Качественные показатели естественных климатических сезонов года и их оценки в условиях влияния астрономических факторов ..... 75
- Андреевская В. Ю., Астапович А. В., Медяников Д. О.* Алгоритм совместной обработки спутниковой и наземной геодезической информации в пространственной системе координат ..... 88
- Бирюков Д. М., Бондаренко А. П., Новиков А. В., Тимощук А. С., Ширококов М. В.* Исследование аномалий общего содержания озона в Арктическом регионе по данным за апрель 2024 года ..... 96
- Готюр И. А., Овчинников Ю. Д.* Оценка информативности предикторов для прогнозирования опасных метеорологических явлений с применением модели глубокого машинного обучения ..... 104

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

- Авсюкевич Д. А., Егоричев М. В.* Концепция построения интеллектуальной адаптивной системы вентиляции и кондиционирования воздуха специальных сооружений ..... 112
- Антропова А. В., Козлов В. В., Стельмах С. Ф.* Математическое моделирование функционирования электромеханических приводов обеспечивающих систем малых космических аппаратов ..... 120
- Аневалов И. В., Гончаров П. С., Зозуля Л. П., Копейка А. Л.* Способ измерения силы тяги электрического ракетного двигателя при наземной экспериментальной отработке ..... 131
- Басотин Е. В., Вивчарь Р. М., Птушкин А. И.* Концепция проактивного управления эксплуатацией наземной космической инфраструктуры ..... 139
- Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В.* Определение мест установки резервных источников электроснабжения ..... 153
- Ефременков И. А., Козлов В. В., Лагун А. В., Сыров А. Д.* Методика оценивания состояния газохода пускового устройства ..... 158
- Камчалов С. С., Карагодин В. В., Полянский К. А.* Методика структурно-параметрической оптимизации системы бесперебойного электроснабжения объектов наземной космической инфраструктуры с применением алгоритмов кластеризации ..... 166
- Манухов И. Г.* Методический подход к экспериментальному оцениванию характеристик сложных военно-технических систем ..... 180
- Миронов А. Н., Петухов А. И., Степанов П. А., Султанов А. Э.* Методика оценивания запаса продольной динамической устойчивости жидкостной ракеты-носителя с последовательным соединением ступеней с использованием узкополосного фильтра ... 191
- Мишук М. Р., Попов Н. А.* Методика двухуровневого контроля технического состояния и диагностирования бортовых систем малых космических аппаратов ..... 199
- Молодова Ю. И., Наумчик И. В., Помошник М. В., Прилуцкий И. К.* Моделирование рабочих процессов в ступенях поршневого компрессора со встроенными в полость нагнетания дополнительными теплообменниками ..... 213
- Попов А. М., Ткаченко В. В., Шмелев В. В.* Методика автоматизированной верификации и отладки структурно-функциональной модели процесса обработки телеметрической информации ..... 220

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

- Голубев М. А., Розанова Л. В.* Модель внутренней системы оценки качества образования военно-учебного заведения ..... 231
- Кужекин Н. С., Мышко В. В., Чукуров В. А.* О подготовке военных специалистов в области информационных технологий с учетом изменчивости требований к профессиональным компетенциям ..... 241
- Соловьев Д. А.* Система подготовки руководящих работников в сфере педагогики высшей военной школы ..... 253

**ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК**

*Огородников В. П.* Актуальные проблемы философско-методологических оснований квантовой механики ..... 259

*Черняев Е.В.* К вопросу о состоянии и тенденциях развития ракетно-космической деятельности в Российской Федерации ..... 267

**ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ**

*Алешичев С. Е., Дуга В. В., Рябова С. С., Сычева А. М.* Математическая обработка экспериментальных данных жаростойкого пенобетона для применения в газохолде универсального стартового комплекса «Ангара»..... 282

**ОПРАТИВНОЕ ИСКУССТВО И ТАКТИКА**

*Гончаров О. В., Казахов Б. Д., Салтыков К. Б.* Методические подходы к изучению и внедрению передового опыта в практику деятельности организационно-технических систем военного назначения ..... 290

Рефераты статей ..... 302

Сведения об авторах ..... 310

Сведения о рецензентах ..... 316

С. А. Багрецов,  
*доктор технических наук, профессор;*  
В. М. Калуга,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
А. А. Михалченков,  
*кандидат военных наук;*  
О. В. Уточкин

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ В КОНТЕКСТНО-СВОБОДНЫХ ГРУППАХ СОВМЕСТНО-ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ИГР НА N-КУБАХ И N-СИМПЛЕКСАХ**

Рассматриваются условия достижения состояний равновесия, устойчивости, совместимости и согласованности совместной деятельности специалистов (операторов) в контекстно-свободных группах, реализующих принципы совместно-индивидуальной деятельности. Эта концепция отражает реалии деятельности групп операторов СВО, выполняющих задачу управления группировкой беспилотных летательных аппаратов. Предполагается, что основой совместной деятельности специалистов в этих группах являются их локальные взаимодействия, основанные на принципах антиципации действий коллег в условиях неопределенности и риска и наличия ограниченных ресурсов, что определяет сущность конфликтных ситуаций, возникающих между ними. Для определения области согласования отношений предпочтения между специалистами таких групп используется теоретико-игровой подход, реализуемый в рамках логики реализации моделей игр на  $n$ -кубах и  $n$ -симплексах, который обеспечивает минимизацию рассматриваемых игровых ситуаций. Для построения математической модели игры используются формальные приемы аппарата теории математического эксперимента. Это дало возможность учесть изменения показателей, вызванных процессами утомления, самообучения и др., а также применения научно-обоснованной методики статистического анализа адекватности моделей.

Ключевые слова: совместная деятельность, антиципация, согласование, устойчивость, равновесие, принцип Парето, планируемый эксперимент, теория игр.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сложность оценки деятельности коллектива операторов, как объекта управления и исследования, «требует целостного изучения системы их внутригрупповой активности в единстве всех ее аспектов» [1–3]. Свойство целостности предполагает необходимость анализа условий для достижения состояний равновесия во внутригрупповом взаимодействии операторов группы, т. е. устойчивости, совместимости и согласованности их деятельности. Специалисты, включаясь в совместную деятельность, наряду с общей целью функционирования группы, могут иметь разные собственные цели. Они могут совпадать или не совпадать с собственными целями других членов формируемого коллектива. Кроме того, различные участники совместной деятельности могут быть наделены разными возможностями в достижении целей. Все это создает трудности в управлении деятельностью такой группы. В связи с этим возникает необходимость согласования стратегий поведения участников совместной деятельности, интегрально определяющих применяемые ими способы действий (решений задач управления), средства и ресурсы (прежде всего временные).

Согласовать элементы совместной деятельности означает придать структуре их взаимоотношений некоторые оптимальные свойства. Решение этой задачи на интуитивном уровне зачастую оказывается далеко не оптимальным. Одним из путей преодоления возникающих здесь трудностей является применение математических методов теоретико-игрового подхода к определению условий согласования участников совместной деятельности, занимающего в психологии все более сильные позиции.

## МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ГРУППАХ УПРАВЛЕНИЯ

Важнейшим моментом в процессе регуляции совместной деятельности является антиципация, т. е. опережение текущих событий, предвидение тенденции их изменения, а также и действий других людей [2, 3, 9]. Именно наличие возможности вероятностной антиципации позволяет участнику совместной деятельности повысить эффективность своих действий в условиях неопределенности и риска. В этой связи термины «оптимальность», «согласованность» следует понимать, как нечто ожидаемое, возможное.

Оптимальными (согласованными) результатами совместной деятельности можно назвать результаты, максимально возможные в условиях применения допустимых стратегий, реализуемых партнерами согласно их целям и мотивам на основе приемлемых способов и средств их достижения [1, 2]. Под «согласованными» понимаются результаты, приводящие к появлению приемлемых для участников совместной деятельности ситуаций, удовлетворяющих некоторым принципам согласования [1, 2]. Эти понятия приобретают особую значимость при исследовании тех видов совместной деятельности, которые развиваются «не за счет централизованных воздействий, а за счет локальных взаимодействий членов коллектива» [3].

Основные принципы согласования элементов совместной деятельности могут базироваться на свойствах устойчивости, равновесия и справедливости. Свойства устойчивости, равновесия выражают сбалансированные возможности партнеров, предопределяющие устойчивость их поведения при принятии решений по выбору того или иного действия, или выбора стратегии поведения. Мотивы, побуждающие участников совместной деятельности придерживаться определенной стратегической позиции, могут различаться и порождать ряд специфических теоретико-игровых принципов согласования их действий, а именно:  $c$ -ядра, устойчивых конфигураций,  $\psi$ -устойчивости, Неймана – Моргенштерна, Нэша и др. [4, 6, 13].

Свойство справедливости связывается с принятием и осознанием партнерами определенной аксиоматики взаимоотношений в процессе совместной деятельности, т. е. носит нормативный характер. Понятие «справедливость» формируется на основе некоторого набора черт, объективно присущих этому свойству. Этим чертам придается характер аксиом, позволяющих вывести дальнейшие свойства конкретных реализаций справедливости в конфликте [5, 6]. На этом свойстве базируются такие принципы согласования, как Вектор Шепли,  $n$ -ядро, арбитражные схемы [6, 13].

Один и тот же принцип согласования элементов совместной деятельности, например принцип индивидуальных решений, может одновременно обладать различными свойствами. Так, решения на основе применения принципа вектора Шепли определяют личный вклад специалиста в деятельность той или иной микрогруппы, в которую он организационно включен. Они могут быть справедливы и для применения принципов  $n$ -ядра, запрещающих любой микрогруппе улучшать свое положение при ухудшении положения микрогрупп, занимающих нижние этажи иерархии.

При управлении совместной деятельностью выбор принципа согласования определяется ее спецификой, сущностью конфликта, возникающего между членами группы. В исследуемой игровой модели предполагается, что существуют конфликтные ситуации, удовлетворяющие рассмотренным выше принципам, и учитывается фактическая реализуемость выбираемого принципа. Все это требует от исследователя научной интуиции и глубокого анализа данного вида совместной деятельности. Следует отметить, что не все принципы согласования в одинаковой мере отвечают сформулированным выше общим требованиям. Так, например, принципу Неймана – Моргенштерна скорее присущ философский смысл, нежели практический [6, 13].

При согласовании целевых задач индивидов в совместной деятельности существенную роль может играть принцип Парето, утверждающий лишь те варианты согласования, которые нельзя улучшить одновременно в интересах всех участников деятельности [5, 10].

Улучшение варианта согласования можно осуществить лишь в интересах одного участника (или одной микрогруппы) за счет ущемления интересов другого (или других микрогрупп). Следовательно, в принципе Парето существенную роль играет свойство эффективности, выгодности выбранного варианта согласования индивидов совместной деятельности для всех ее участников. Принцип Парето не предлагает единственного решения вопроса, но, как правило, существенно сокращает множество альтернатив [5].

Однако эффективность варианта по Парето не гарантирует высокого качества регулярной функции совместной деятельности специалистов в группе, так как невыполнение каким-либо участником условий согласования может вполне соответствовать его индивидуальным целям. Реализация этого намерения приводит к снижению эффективности совместной деятельности и идет вразрез с общей целью партнеров групповой деятельности. Чтобы исключить подобные ситуации, вариант согласования элементов совместной деятельности должен быть таким, чтобы нарушение условий согласования противоречило бы целям и мотивам каждого участника. Такие варианты отвечают принципу устойчивости (равновесия) по Нэшу [6, 13]. Однако чаще всего варианты согласования по Парето не являются устойчивыми по Нэшу. Совмещение этих принципов в одном и том же варианте согласования всегда отвечает какой-либо практически значимой стороне совместной деятельности. В частности, это может отвечать варианту совместной деятельности коллектива специалистов, находящегося на высоком уровне социального развития, у которого интегративные процессы существенно преобладают над явлениями дифференциации. Варианты, удовлетворяющие этому требованию, носят название гермейеровских [7]. Еще сложнее преодолеть противоречия между свойствами эффективности (по Парето) и устойчивости (по Нэшу). Сложность заключается в построении формализованной системы предпочтений при выборе вариантов согласования. Дело в том, что значения связи между теми или иными решениями, принимаемыми участниками совместной деятельности, и ожидаемыми показателями качества согласования, как правило, неизвестны. Это маскирует направление рациональных действий партнеров, затрудняет распределение их усилий.

Для поиска вариантов согласования используются методы последовательного решения ряда задач математического программирования. Однако эти способы эффективны лишь в том случае, когда геометрическим образом множества вариантов согласования по Парето является выпуклая многогранная фигура [7]. В противном случае поиск вариантов резко усложняется. Выходом из подобного положения может служить метод построения математических моделей совместной деятельности на основе игр на  $n$ -кубе ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ) [5, 6, 13]. В данных моделях стратегии поведения членов группы рассматриваются как общий ресурс отдельно взятого члена группы ко всем остальным ее сотрудникам. Например, общим ресурсом используемых стратегий могут быть контроль деятельности партнера, самоконтроль своей деятельности и т. д. Следующим примером стратегий взаимодействия членов группы может быть оказание непрерывной помощи партнерам, сосредоточение всех усилий на своей деятельности, оказание помощи в случайные промежутки времени.

В  $n$ -мерном пространстве игра на  $n$ -кубе может быть условно изображена гиперкубом в  $n$ -мерной прямоугольной системе координат. При  $n = 2$  – это игра на квадрате, при  $n = 3$  – игра на кубе, при  $n \geq 4$  – на гиперкубе. Обозначим через  $P_i$  вероятность того, что  $i$ -й участник совместной деятельности отдаст предпочтение той или иной стратегии взаимодействия с партнерами. Тогда в терминах теории игр ситуациям в чистых стратегиях соответствуют точки, принадлежащие вершинам этих фигур, а ситуациям в смешанных стратегиях – остальные. Всем этим точкам соответствует некоторый набор значений индивидуальных показателей качества  $y = \{y_i\}$ ; ( $i = 2, 3, \dots$ ) согласования.

Таким образом,  $n$ -куб отображает пространство игры  $n$  лиц. В теории игр доказано [4], что выбор определенного варианта согласования (по Парето) эквивалентен указанию весовых коэффициентов согласуемых элементов в их целостной структуре взаимоотношений. Для нахождения весовых характеристик элементов структуры совместной деятельности



можно воспользоваться результатами математической теории эксперимента [8, 12]. В их целях целесообразно перейти от системы координат  $(P_1, P_2, \dots)$  к относительной системе координат  $(x_1, x_2, \dots)$  в соответствии с формулой

$$x_i = \frac{P_i - P_{i\delta}}{\Delta P_i}, \quad (1)$$

где  $P_{i\delta}, \Delta P_i$  – соответственно базовое значение вероятности выбора партнерами их стратегий (элементов структуры совместной деятельности) и интервал изменения вероятности выбора.

В относительной системе координат ситуациям в чистых стратегиях соответствуют наборы  $(x_1, x_2, \dots)$ , где каждая переменная принимает значение +1 или -1. Ситуациям в смешанных стратегиях соответствуют значения этих переменных  $-1 < x_i < +1$ .

От пространственного изображения игры можно перейти к ее табличной форме записи – матрице, где каждая строка описывает ситуацию в чистых или смешанных стратегиях в зависимости от вида матрицы (первого или второго порядка). Нетрудно убедиться в том, что такая матрица удовлетворяет условиям ортогональности, нормировки и симметричности [8, 13]. Следовательно, при построении математической модели игры можно использовать все формальные приемы аппарата теории математического эксперимента. Появляется возможность описания всего множества конфликтных ситуаций, возникающих при совместной деятельности, системой многофакторных моделей регрессионного типа первого или второго порядка. Как известно, в моделях, полученных таким образом, коэффициенты являются весовыми характеристиками, что и требуется для поиска вариантов согласования элементов совместной деятельности по принципу Парето.

Поиск вариантов согласования можно вести путем сведения их к общей задаче математического программирования [7]. Можно также воспользоваться графоаналитическими методами канонических преобразований, плавающего начала координат и двумерных сечений [12]. В последнем случае строятся линии равного выхода для различных фиксированных значений показателей  $y$  в системе координат  $(P_1, P_2, \dots)$  или  $(x_1, x_2, \dots)$ . Эти графики позволяют построить множество предельных возможностей [7] в системе координат  $(y_1, y_2, \dots)$ . Анализ структуры данного множества неизбежно завершается нахождением множества Парето, т. е. множества вариантов согласования совместной деятельности, обладающих свойством эффективности. Наиболее правильным следует считать отыскание области согласования, одновременно удовлетворяющей принципам Парето и Нэша, если таковая существует для найденной системы моделей совместной деятельности.

Модели игр на  $n$ -симплексах целесообразно применять в случаях, когда партнеры по совместной деятельности пользуются единым «фондом ресурсов управления», ограниченным по объему. Геометрическим образом игры является  $n$ -симплексная решетка [6, 13], вершины которой можно поставить в соответствие с ситуациями чистых стратегий, выбираемых каждым из  $n$  участников совместной деятельности из общего фонда. При  $n = 3$  – это игра на треугольнике, при  $n = 4$  – на тетраэдре и т. д. Остальным узлам решетки соответствуют ситуации в смешанных стратегиях. Симплексная решетка для игры на  $n$ -симплексе отроится в условной  $n$ -мерной треугольной системе координат. Вдоль сторон симплекса (или его ребер, граней) откладываются вероятности  $P_i$  выбора  $i$ -м игроком стратегии из их общего фонда.

Таким образом, вид геометрической фигуры определяется количеством  $n$  участников совместной деятельности, а число узлов симплексной решетки – объемом общего фонда стратегий. Узлам и вершинам симплексной решетки соответствуют значения индивидуальных показателей качества  $y^{(i)}$  согласования элементов совместной деятельности.

Достоинством моделей совместной деятельности, получаемых на основе игр на  $n$ -кубах и  $n$ -симплексах, кроме простоты их смысловой интерпретации, является также отсутствие ограничивающего условия на вид связи между показателями  $y$ . В классической теории игр эту связь обычно принимают линейной [5, 6], что не всегда отвечает истине. Кроме того, логика построения моделей игр на  $n$  кубах и  $n$ -симплексах обеспечивает поиск области согла-

сования элементов совместной деятельности по минимуму игровых ситуаций. При этом могут быть учтены изменения показателей, вызванные, например, процессами утомления, самообучения и др. Наконец, появляется возможность применения научно-обоснованной методики статистического анализа адекватности моделей.

В достоинствах методов моделирования совместной деятельности с использованием игр на  $n$ -кубах и  $n$ -симплексах можно убедиться на примерах.

Пример 1. Управляя объектом, два оператора помимо функционально необходимых или рабочих операций выполняют вспомогательные операции двух типов: контроль партнера (внешний контроль) и контроль своих действий (самоконтроль). Необходимость выполнения вспомогательных операций вызвана взаимосвязанным характером структуры деятельности операторов, заинтересованностью каждого оператора в высоких результатах их совместной деятельности.

Выбор вспомогательных операций в каждой конкретной ситуации определяется взаимной информированностью операторов, как об уровне квалификации партнера, так и его способности безошибочно и своевременно выполнять ту или иную рабочую операцию или их совокупность. Уверенность в партнере позволяет каждому оператору сосредоточить внимание на качестве своих действий, т. е. применять в процессе управления объектом операции самоконтроля. Наоборот – неуверенность в партнере вызывает потребность контроля, подстраховки его действий.

Таким образом, в процессе совместной деятельности возникают ситуации, обусловленные выбором каждым оператором того или иного типа вспомогательных операций. Совокупность этих операций, выбранных в данный момент, определяет продолжительность их выполнения. Критерием качества работы операторов служит математическое ожидание времени выполнения операций, функционально необходимых для достижения цели управления объектом.

Формально совместную деятельность двух операторов можно свести к игре на  $n$ -кубе. Игровое пространство представляет собой квадрат (рис. 1) построенный в координатах  $P_1, P_2$ , где  $P_i$  – вероятность выбора  $i$ -м игроком (оператором) одной из своих стратегий (того или иного типа вспомогательных операций). Вершинам квадрата соответствуют пары  $(P_1, P_2)$ , где каждая из вероятностей принимает значения 0 или 1. Например,  $P_i = 1$  соответствует выбору  $i$ -м игроком стратегии 1, т. е. операции внешнего контроля, а  $P_i = 0$  – выбору стратегии 2, т. е. операции самоконтроля.

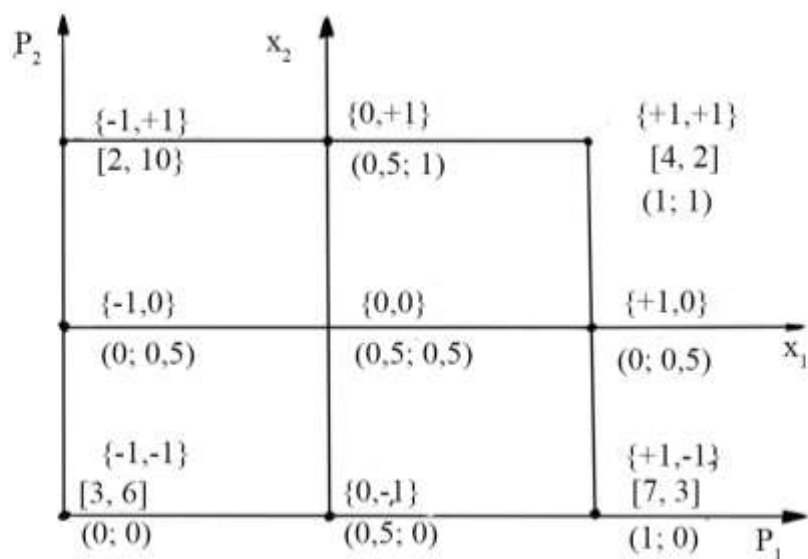


Рис. 1. Геометрический образ игры на квадрате

Пары  $[\bar{t}_1, \bar{t}_2]$ , изображенные на рис. 1 в прямоугольных скобках у вершин квадрата, являются набором значений показателей качества выполнения рабочей операции в ситуациях с чистыми стратегиями. Эти данные получены экспериментально.

Фигурными скобками обозначены ситуации в чистых стратегиях, записанные в относительной системе координат  $x_1, x_2$ . Матрица игры на квадрате приведена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица игры на квадрате

Номер ситуации	Ситуация в системе координат				Значения показателя, усл. ед.	
	абсолютной		относительной		$\bar{t}_1$	$\bar{t}_2$
	$P_1$	$P_2$	$x_1$	$x_2$		
1	0	0	-1	-1	5	6
2	1	0	+1	-1	7	8
3	0	1	-1	+1	2	10
4	1	1	+1	+1	4	2

Система математических моделей совместной деятельности операторов, найденная на основе известных в математической теории эксперимента формул [8, 13], имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{t}_1 &= 4 + 1,5x_1 - x_2 - 0,5x_1x_2; \\ \bar{t}_2 &= 5,25 - 2,75x_1 + 0,75x_2 - 1,25x_1x_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Статистический анализ моделей, входящих в систему (2), подтвердил их адекватность экспериментально полученным результатам совместной деятельности. Семейство моделей, построенное для различных значений показателей  $\bar{t}_i$ , представлено на рис. 2, а соответствующее этому семейству приближенное множество предельных возможностей игры – на рис. 3. Анализ этого множества позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, свойству эффективности (принципу Парето) отвечают те варианты согласования стратегий игроков, которые соответствуют отрезку  $ab$  (рис. 3). Реализация этого принципа в процессе совместной деятельности требует от игроков выбора чистых и смешанных стратегий из области Парето (штриховые линии на рис. 3).

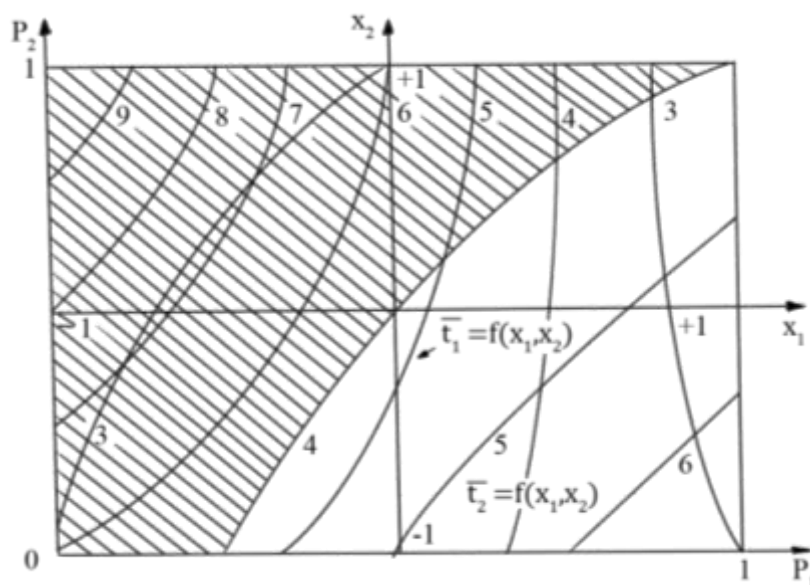


Рис. 2. Линии равного выхода модели совместной деятельности

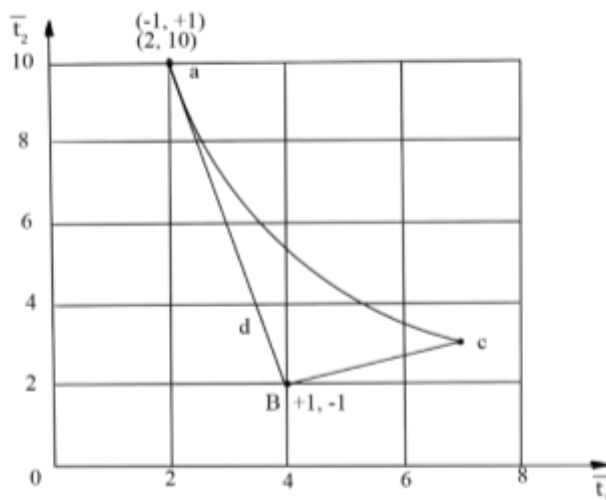


Рис. 3. Приближенное множество предельных возможностей игры

Как видно, однозначного выбора такое решение не предлагает. Предпочтение тому или иному варианту может быть отдано в том случае, когда совместная деятельность операторов будет управляться третьим лицом – руководителем.

Управление может заключаться, например, в выдаче операторам установки на работу с равными временами выполнения операций (точка  $d$ , рис. 3). Операторы, реализуя эту установку, осуществляют внешний контроль действий партнера с вероятностями  $P_1 = 1$  и  $P_2 = 0,8$  и обеспечивают среднее время выполнения операций, равное  $\bar{t}_i = 3,6$  усл. ед. ( $i = 1,2$ ).

Установка на минимум среднего времени выполнения операций первым оператором (точка  $a$  на рис. 3) при непрерывном внешнем контроле со стороны второго оператора ( $P_2 = 1$ ) требует детерминированного выбора им стратегии постоянного самоконтроля своих действий ( $P_1 = 0$ ). Значения показателей качества работы операторов при этом равны  $\bar{t}_1 = 2$ ,  $\bar{t}_2 = 10$  усл. ед.

Аналогично может быть найдена структура действий партнеров при других видах установок (на лучшие показатели выполнения операций вторым оператором, на минимум суммарного времени и т. д.).

Если рассматривать установку на некоторую приемлемую для обоих операторов аксиоматику взаимоотношений в процессе совместной деятельности, то выбранные варианты согласования стратегий при непосредственном участии руководителя будут отвечать свойству справедливости.

Свойством устойчивости равновесия по Нэшу не обладает ни один из вариантов согласования. Любой вариант создает для каждого из операторов условия, стимулирующие его отказ от данного варианта в пользу другого, обеспечивающего более высокие индивидуальные показатели. В качестве фактора может выступать лишь система мотивов, опосредованных общей целью совместной деятельности, значимой для обоих операторов.

**Пример 2.** Технологическая схема проведения профилактических работ на сложной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) предусматривает одновременное участие в них трех операторов. В плане взаимодействия с партнерами каждый  $i$ -й оператор располагает тремя стратегиями: оказывать непрерывную помощь партнерам ( $P_i = 1$ ); полностью сосредоточивать внимание только на выполнении своих обязанностей ( $P_i = 0$ ); оказывать помощь в случайные моменты времени ( $P_i = 0,5$ ). Учитывая, что партнеры равноправны в выборе стратегий, а события, состоящие в выборе стратегий, составляют полную группу, можно записать выражение, отображающее свойство общности и ограниченности «фонда средств управления» следующим образом:

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1. \quad (3)$$

В частности, из (3) следует, во-первых, если один из операторов выбрал чистую первую стратегию, то остальные должны придерживаться своих чистых вторых стратегий; во-вторых, операторы обязаны осуществлять выбор стратегий только из трех имеющихся.

Каждой ситуации, образуемой в результате выборов операторами стратегий, соответствует набор значений показателей  $(\bar{t}^{(1)}, \bar{t}^{(2)}, \bar{t}^{(3)})$ , где  $\bar{t}^{(i)}$  – математическое ожидание времени выполнения профилактических работ на РЭА  $i$ -м оператором. Так как в данной задаче  $n = 3$ , то пространство игры на  $n$ -симплексе может быть представлено треугольником (рис. 4) или 3-симплексной решеткой. Матрица игры на треугольнике приведена в табл. 2. Величины математических ожиданий времени выполнения профилактических работ определяются экспериментальным путем.

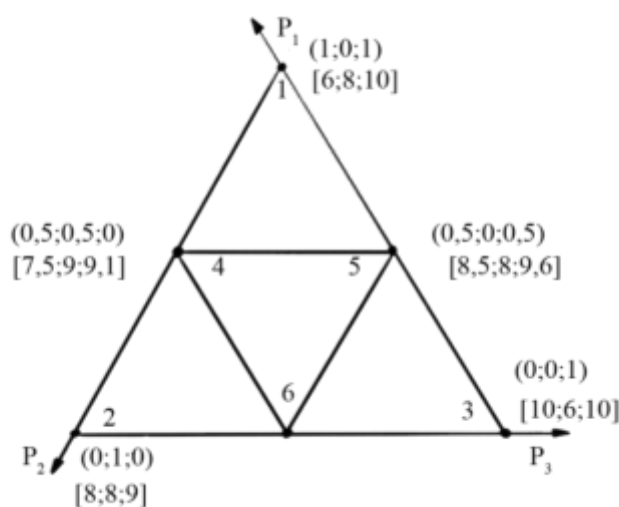


Рис. 4. Геометрический образ игры трех лиц на симплексе

Таблица 2

Матрица игры на треугольнике

Номер ситуации	Ситуации			Значение показателей, усл. ед.		
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\bar{t}^{(1)}$	$\bar{t}^{(2)}$	$\bar{t}^{(3)}$
1	1	0	0	$\bar{t}_1^{(1)} = 6$	$\bar{t}_1^{(2)} = 10$	$\bar{t}_1^{(3)} = 8$
2	0	1	0	$\bar{t}_2^{(1)} = 8$	$\bar{t}_2^{(2)} = 8$	$\bar{t}_2^{(3)} = 9$
3	0	0	1	$\bar{t}_3^{(1)} = 10$	$\bar{t}_3^{(2)} = 6$	$\bar{t}_3^{(3)} = 10$
4	0,5	0,5	0	$\bar{t}_{12}^{(1)} = 7,5$	$\bar{t}_{12}^{(2)} = 9$	$\bar{t}_{12}^{(3)} = 9,1$
5	0,5	0	0,5	$\bar{t}_{13}^{(1)} = 8,5$	$\bar{t}_{13}^{(2)} = 8$	$\bar{t}_{13}^{(3)} = 9,6$
6	0	0,5	0,5	$\bar{t}_{23}^{(1)} = 9$	$\bar{t}_{23}^{(2)} = 7$	$\bar{t}_{23}^{(3)} = 8,9$

Система полиномов Шеффе, моделирующая совместную деятельность операторов, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \bar{t}^{(1)} &= 6p_1 + 8p_2 + 10p_3 + 2p_1p_2 + 2p_1p_3; \\
 \bar{t}^{(2)} &= 10p_1 + 8p_2 + 6p_3; \\
 \bar{t}^{(3)} &= 8p_1 + 9p_2 + 10p_3 + 2,5p_1p_2 + 2,5p_1p_3 - 2,5p_2p_3.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Расчет коэффициентов и проверка полиномов на адекватность проводились в соответствии с положениями теории планирования эксперимента при исследовании свойств смесей [12]. Графики, построенные по системе (4), представлены на рис. 5. Поиск вариантов согласования элементов взаимодействия операторов (стратегий) осуществлялся способами, которые применялись в примере 1. Область существования вариантов, согласованных по принципу Парето при ограничивающем условии  $9,2 \leq \bar{t}^{(3)} \leq 9,3$ , выделена штриховыми линиями (рис. 5).

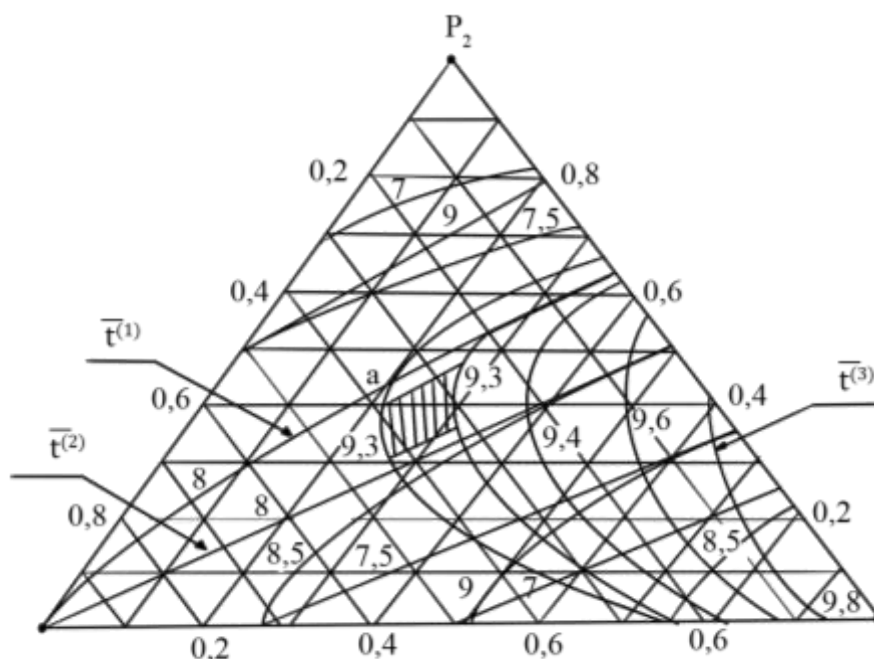


Рис. 5. Линии равного выхода системы полиномов Шэффе

Так, для одного из эффективных вариантов, принадлежащих этой области (точка  $a$  на рис. 5), решение может быть записано в виде набора смешанных стратегий игроков:

$$P = (P_1; P_2; P_3) = (0,4; 0,4; 0,2).$$

Следовательно, если два оператора будут выбирать первую стратегию с вероятностями  $P_1 = P_2 = 0,4$ , а третий – с вероятностью  $P_3 = 0,2$ , то их ожидаемые результаты работы составят  $\bar{t}^{(1)} = 8,1$ ;  $\bar{t}^{(2)} = 8,4$ ;  $\bar{t}^{(3)} = 9,2$ . По Нэшу это решение не является устойчивым.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активное применение в настоящее время беспилотных летательных аппаратов и, особенно, их группировок в решении стратегических задач, определяет необходимость анализа новых видов совместной деятельности операторов, которые развиваются не за счет централизованных воздействий, а за счет рационально реализованных локальных взаимодействий членов коллектива операторов. Это требует определения условий применения допустимых стратегий, реализуемых партнерами согласно их целям и мотивам на основе приемлемых способов и средств их достижения устойчивости, их поведения при принятии решений по выбору того или иного действия или выбора стратегии поведения.

В статье предложено решение такой задачи на основе моделирования совместной деятельности операторов на основе игр на  $n$ -кубе ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ) [5, 6, 13]. В данных моделях

стратегии поведения любого оператора группы рассматриваются как общий ресурс каждого члена группы. Это позволяет в условиях комплектования групп операторов определить их наиболее эффективные стратегии взаимодействия.

### Список используемых источников

1. *Донцов А. И.* Психология коллектива. – М., 1984. – 208 с.
2. *Ломов Б. Ф.* О путях построения теории инженерной психологии на основе системного подхода // Хрестоматия по инженерной психологии. – М. : Высш. шк., 1991. – С. 144–175.
3. Диагностика социально-психологических характеристик малых групп с внешним статусом / С. А. Багрецов [и др.]. – СПб. : Лань; Изд-во Санкт-Петербург. ун-та МВД России, 1999. – 640 с.
4. *Вилкас Э. И., Майминас Е. З.* Решения: теория, информация, моделирование. – М. : Радио и связь, 1981. – 328 с.
5. *Дубина И. Н.* Основы теории экономических игр : учеб. пособие. – М. : КНОРУС, 2013. – 245 с.
6. *Дюбин Г. Н., Суздаль В. Г.* Введение в прикладную теорию игр. – М. : Наука, 1981. – 336 с.
7. *Козлов В. Н.* Системный анализ, оптимизация и принятие решений : учеб. пособие. – М. : изд-во «Проспект», 2014. – 176 с.
8. *Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н.* Методы планирования эксперимента и обработка данных : учеб. пособие. – Самара : Самар. гос. ун-т, 2016. – 131 с.
9. *Багрецов С. А., Бондаренко А. В., Обносов Б. В.* Квалиметрия групповой деятельности операторов сложных систем управления. – М. : ВНИИТИ, 2004. – 444 с.
10. *Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Квалиметрия моделей и полимодальных комплексов : моногр. – М. : РАН, 2018. – 314 с.
11. *Шевцов Г. С.* Линейная алгебра: теория и прикладные аспекты : учеб. пособие. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Магистр; ИНФРА-М, 2014. – 544 с.
12. *Зедгенцдзе И. Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М. : Наука, 1976. – 388 с.

Н. А. Барина<sup>1</sup>;  
Р. М. Дулишкин<sup>2</sup>;  
М. Ю. Касавцев<sup>3</sup>,

*кандидат технических наук*

<sup>1,3</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

<sup>2</sup> Управление учета военнослужащих ГУК МО РФ, г. Москва.

## **МОДЕЛЬ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ И АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ЛИЧНОСТНЫХ КАЧЕСТВ В СПЕЦИАЛЬНОМ ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ «ОБРАЗОВАНИЕ-МО»**

В статье рассмотрены модель обучающегося и алгоритм оценивания его профессионально-личностных качеств, которые могут быть реализованы в электронной информационно-образовательной среде военного вуза. Практика применения специального программного обеспечения «Образование-МО» выявила необходимость создания модуля оценивания профессионально-личностных качеств обучающегося, а анализ существующих результатов исследований показал отсутствие подобной модели и алгоритма для ее реализации. Поиску путей разрешения этого противоречия посвящена данная работа.

Ключевые слова: модель обучающегося, алгоритм оценивания профессионально-личностных качеств, электронная информационно-образовательная среда, специальное программное обеспечение.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Деятельность современного вуза неотъемлемо связана с информационно-образовательной средой (ИОС), обеспечивающей высокое качество и доступность образования всех видов и уровней. В военных образовательных организациях в рамках ИОС внедрено специальное программное обеспечение «Образование-МО» (далее – СПО), которое служит основой электронной образовательной среды вуза [1, 2].

Практика применения СПО показала необходимость его совершенствования, а именно нуждается в доработке раздел оценки профессионально-личностных качеств курсанта. Это вызвано необходимостью наличия в разделе оценки компетенций программного модуля, отвечающего за обработку составляющей оценки профессионально-личностных качеств (ПЛК) обучающегося, поскольку известно [3], что оценивание компетенций будущего специалиста без слагаемого ПЛК не корректно. В основе данного модуля должны быть модель и алгоритм оценивания ПЛК курсанта, их разработка – цель настоящей статьи. Кроме того, решение задачи доработки СПО представляется актуальным с точки зрения достижения «цифровой зрелости» в образовании в рамках выполнения национальной программы «Цифровая трансформация» [4].

В результате анализа научных публикаций выяснилось, что вопросы оценивания профессионально-личностных качеств курсантов исследовались и были рассмотрены множеством авторов с разных точек зрения. Так, теоретические аспекты разработки методов, методик и способов диагностики ПЛК обучающихся рассматривались авторами в публикациях [5–10]. Результаты эмпирических исследований представлены перечнем статей [11, 12] и работами патентного права [15–20]. Однако представленные результаты либо больше акцентированы на оценивание знаний, умений и навыков, либо реализованы уникальной компьютерной программой для конкретной специальности без возможности интеграции в СПО.

Рассмотрение данных источников позволило выявить противоречие: существующие различные способы и подходы к оцениванию ПЛК обучающихся, в том числе реализованные при помощи программ для ЭВМ, с одной стороны, и отсутствие единой модели и алгоритма оценивания определенного набора ПЛК, присущих будущему офицеру, как составляющей профессио-



нальной компетенции для СПО, с другой. Для разрешения данного противоречия была сформулирована цель исследования – разработка модели и алгоритма оценивания ПЛК курсанта.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ЛИЧНОСТНЫХ КАЧЕСТВ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Задача оценивания профессионально-личностных качеств обучающихся может быть сформулирована следующим образом: определение уровня сформированности ПЛК курсанта по совокупности показателей данных психологической диагностики.

### Математическая постановка задачи.

*Дано:*

1) множество  $\Omega$  ПЛК с параметром  $n$ , где  $n$  – количество ПЛК;

2) составляющие  $\Psi$  ПЛК:

– множество  $D$  качеств, формирующих дисциплинированность,  $D = \{\Psi_1 \dots \Psi_3\}$ , где  $\Psi_1$  – добросовестность,  $\Psi_2$  – ответственность,  $\Psi_3$  – соблюдение законности;

– множество  $K$  качеств, формирующих командирскую волю,  $K = \{\Psi_4 \dots \Psi_7\}$ , где  $\Psi_4$  – самоконтроль,  $\Psi_5$  – волевой контроль,  $\Psi_6$  – самообладание,  $\Psi_7$  – настойчивость;

– множество  $O$  – организаторские способности,  $O = \{\Psi_8 \dots \Psi_{10}\}$ , где  $\Psi_8$  – лидерский потенциал,  $\Psi_9$  – направленность,  $\Psi_{10}$  – организаторский потенциал;

– множество  $\Psi$  качеств, формирующих психологические качества,  $\Psi = \{\Psi_{11} \dots \Psi_{13}\}$ , где  $\Psi_{11}$  – смелость,  $\Psi_{12}$  – интеллект,  $\Psi_{13}$  – эмоциональная устойчивость;

– параметр  $T$  – творческая активность.

*Найти:* зависимость сформированности ПЛК  $L$  от значений показателей уровня ее составляющих:  $L = f(D, K, O, \Psi, T)$ .

## МОДЕЛЬ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩАЯ ЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ЛИЧНОСТНЫЕ КАЧЕСТВА

По аналогии с работой [19] под «профессионально-личностными качествами» будем понимать компетентностные, мотивационно-прогностические, морально-поведенческие индивидуальные свойства военнослужащего, которые позволяют ему выполнять свои функциональные обязанности, т. е., по сути, это требования к компетенциям (знаниям, умениям, навыкам и личностным качествам) офицера Вооруженных сил Российской Федерации.

Таким образом, профессиональную компетенцию запишем выражением

$$K = З + У + Н + ЛК, \quad (1)$$

где  $K$  – компетенция;

$З$  – знания;

$У$  – умения;

$Н$  – навыки;

$ЛК$  – личностные качества.

Набор исследуемых ПЛК включает: военно-профессиональную компетентность, дисциплинированность, командирскую волю, организаторские способности, творческую активность, психологические и физические качества [20]. По способу оценивания ПЛК и с учетом

модели процесса формирования личностных качеств военнослужащих при повседневной деятельности, разработанной в работе [21], условно разделим их на две группы.

*Первая группа* – военно-профессиональная компетентность и физические качества. Составляющие этой группы представляют собой оценку результатов деятельности курсанта на учебных занятиях, научных и творческих мероприятиях, спортивных состязаниях и т. п., модель их оценивания для СПО «Образование-МО» разработана авторами работы [22].

*Вторая* – дисциплинированность, командирская воля, организаторские способности, творческая активность, психологические качества. Здесь сгруппированы качества, для которых нет единого подхода к оцениванию, в том числе применительно к СПО «Образование-МО», поэтому модель и алгоритм оценивания показателей данной группы рассмотрим в данной статье.

Совокупность показателей для оценивания личностных качеств курсантов (табл. 1), использованная авторами (составляющие конкретного ПЛК, диагностические инструменты, критерии оценивания и шкалы оценок), входит в арсенал тестовой библиотеки автоматизированного рабочего места военного психолога 83т379 (АРМ ВП 83т379) [23], применяемого в Вооруженных силах Российской Федерации в соответствии с указаниями Департамента психологической работы Министерства обороны Российской Федерации для повышения эффективности мероприятий психологического сопровождения учебно-боевой деятельности войск на основе применения компьютерных технологий психодиагностического обследования военного и гражданского персонала воинских частей и учреждений.

Таким образом, оценка отдельной составляющей ПЛК  $\Theta_{\Psi_1.. \Psi_{14}}$  будет определяться выражением

$$\Theta_{\Psi_1.. \Psi_{14}} = \mu_{1..14} \times \xi_{1..14}, \quad (2)$$

где  $\mu_{1..14}$  – балл диагностируемого ПЛК;

$\xi_{1..14}$  – среднее значение весового коэффициента ПЛК для конкретного диагностируемого качества, определяется методом экспертной оценки для основных видов деятельности будущего выпускника.

В свою очередь оценка конкретного ПЛК ( $\Omega_{1..5}$ ), вычисляется по одному из пяти выражений:

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \left( \sum_{i=1..3} \Theta_i \right) / 3; \quad \Omega_2 = \left( \sum_{j=4..7} \Theta_j \right) / 4; \\ \Omega_3 &= \left( \sum_{k=8..10} \Theta_k \right) / 3; \quad \Omega_4 = \left( \sum_{q=11..13} \Theta_q \right) / 3; \\ \Omega_5 &= \Theta_{14}. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Theta_{\Psi_1.. \Psi_{14}}$  – оценка отдельной составляющей ПЛК  $\{\Psi_1.. \Psi_{14}\}$ ;

$i, j, k, q, v$  – количество составляющих каждого из пяти ПЛК.

Интегральная оценка ПЛК ( $\Upsilon$ ) определяется по формуле

$$\Upsilon = \left( \sum_{w=1..5} \Omega_w \right) / 5. \quad (4)$$

В целом расчет интегральной оценки ПЛК курсанта производится по разработанному авторами алгоритму.

Таблица 1

Таблица показателей для оценивания личностных качеств курсантов

ШПК	Содержание	Шифр качества	Диагностический инструмент	Критерий	Результат (стены)	Диапазон баллов, (Δ <sub>1-14</sub> )	Уровни	Группы уровней	Значение уровня	Оценка (M <sub>1-14</sub> )	Вес. коэфф. (ξ <sub>1-14</sub> )						
1. Дисциплинированность, Ω <sub>1</sub>	Добросовестность	Ψ <sub>1</sub>	10-ФЛО	Фактор G	8-10	100-120	ВУ	У2	Отл.	3	0,8						
					7	80-100	ВС		Отл.	2,5							
	Ответственность	Ψ <sub>2</sub>	КЛО	Шкала Re	5-6	60-80	СУ		Хор.	2	0,8						
					4	40-60	НС		Хор.	1,5							
					1-3	30-40	НУ		Уд.	1							
					8-10	90-120	ВУ	У1	Отл.	3							
					5-6	70-90	ВС		Хор.	2,5							
					7	50-70	СУ		Хор.	2							
	Соблюдение законности	Ψ <sub>3</sub>	КЛО	Шкала Lo	4	30-50	НС		Уд.	1	1						
					8-10	90-120	ВУ	У1	Отл.	3							
	2. Командирская воля, Ω <sub>2</sub>	Самоконтроль	Ψ <sub>4</sub>	КЛО	Шкала Sc	8-10	90-120	ВУ	У1	Отл.	3	0,75					
						5-6	70-90	ВС		Хор.	2,5						
		Волевой контроль	Ψ <sub>5</sub>	ВСК	Шкала В	7	50-70	СУ		Хор.	2	0,75					
						4	30-50	НС		Уд.	1						
8-10						90-120	ВУ	У1	Отл.	3							
5-6						70-90	ВС		Хор.	2,5							
7						50-70	СУ		Хор.	2							
4						30-50	НС		Уд.	1							
3. Организаторские способности, Ω <sub>3</sub>						Самообладание	Ψ <sub>6</sub>	ВСК	Суб-шкала самообладание (С)	8-10	70-120		ВУ	У3	Отл.	3	0,85
										5-7	50-70		СУ		Хор.	2	
	Настойчивость	Ψ <sub>7</sub>	ВСК	Шкала Н	4	30-50	НУ		Уд.	1	0,8						
					8-10	70-120	ВУ	У3	Отл.	3							
	Лидерский потенциал	Ψ <sub>8</sub>	КЛО	Шкала Lp	5-7	50-70	СУ		Хор.	2	0,8						
					4	30-50	НУ		Уд.	1							
					8-10	90-120	ВУ	У1	Отл.	3							
					5-6	70-90	ВС		Хор.	2,5							
					7	50-70	СУ		Хор.	2							
					4	30-50	НС		Уд.	1							
	Направленность	Ψ <sub>9</sub>	Анкета	НС НВ НЗ	8-10	70-120	ВУ	У3	Отл.	3	1						
					5-7	50-70	СУ		Хор.	2							
	4. Психологические качества, Ω <sub>4</sub>	Организаторский потенциал	Ψ <sub>10</sub>	КЛО	Шкала Mp	1-4	30-50	НУ		Уд.	1	0,8					
						8-10	90-120	ВУ	У1	Отл.	3						
Смелость		Ψ <sub>11</sub>	16-ФЛО	Фактор Н	5-6	60-80	СУ		Хор.	2,5	0,8						
					7	50-70	СУ		Хор.	2							
					4	40-60	НС		Уд.	1							
					1-3	30-40	НУ		Уд.	1							
Интеллект	Ψ <sub>12</sub>	КЛО	Фактор В	8-10	100-120	ВУ	У2	Отл.	3	0,7							
				7	80-100	ВС		Отл.	2,5								
				5-6	60-80	СУ	У2	Хор.	2								
Эмоциональная устойчивость	Ψ <sub>13</sub>	КЛО	Фактор С	4	40-60	НС		Хор.	1,5	0,8							
				1-3	30-40	НУ	У2	Уд.	1								
5. Творческая активность, Ω <sub>5</sub>	Творческие способности	Ψ <sub>14</sub>	КЛО	Шкала St	8-10	90-120	ВУ	У1	Отл.	3	0,95						
					5-6	70-90	ВС		Хор.	2,5							
					7	50-70	СУ		Хор.	2							
					4	30-50	НС		Уд.	1							

## АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ЛИЧНОСТНЫХ КАЧЕСТВ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Рассмотрим работу алгоритма.

*Шаг 1.* Работа пользователя начинается в модуле аутентификации, авторизации и выбора обучающегося (ААВ), где пользователь выполняет указанные процедуры. После этого инициализируется модуль оценки ПЛК курсанта (ОПЛКК), который включает в себя три подмодуля расчета оценок РО-У1, РО-У2, и РО-У3, их работу рассмотрим ниже. Если параметры указаны не верно, происходит возврат в начало.

*Шаг 2.* В модуле ОПЛКК пользователь вводит совокупность данных психологической диагностики (табл. 2), которую с учетом различий и особенностей инструментов психологической диагностики условно разделим на три группы – У1, У2, У3:

$$У1 = \{\Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_8, \Psi_{10}, \Psi_{14}\}; \quad (5)$$

$$У2 = \{\Psi_1, \Psi_{11}, \Psi_{12}, \Psi_{13}\}; \quad (6)$$

$$У3 = \{\Psi_6, \Psi_7, \Psi_9\}. \quad (7)$$

В показателях критериев, в зависимости от применяемого диагностического инструмента, были установлены и определяются различные уровни (ВУ – высокий, ВС – выше среднего, СУ – средний, НС – ниже среднего, НУ – низкий). Каждой группе присущ свой набор уровней: (У1 – ВУ, ВС, СУ, НС); (У2 – ВУ, ВС, СУ, НС, НУ); (У3 – ВУ, СУ, НУ).

Таблица 2

Таблица сравнимых показателей и результаты вычислений

№	Показатель	Обозначение	+/-	Угол	Синус	Вес	Max	Kom	VPP	Ing	Sce	K1	K2
1	Показатель 1	Дисциплин.	+	72	0.9511	0.87	2.6000	2.6000	2.0700	2.1300	2.1300	2.6000	1.6000
2	Показатель 2	Ком.Воля	+	72	0.9511	0.79	2.3600	2.1600	2.3600	1.5800	1.5800	0.7900	2.3600
3	Показатель 3	Орг.Сп.	+	72	0.9511	0.87	2.6000	2.6000	2.3300	1.8000	1.9300	0.8700	0.8700
4	Показатель 4	Пси.Кач.	+	72	0.9511	0.73	2.2000	2.2000	1.8200	1.9700	1.6200	0.7300	0.7300
5	Показатель 5	Творч.	+	72	0.9511	0.95	3.9500	3.4500	3.9500	3.9500	3.9500	1.9500	3.9500

Нормализованные показатели и результаты вычислений

Показатель	Max	Kom	VPP	Ing	Sce	K1	K2
Дисциплин.	1.0000	1.0000	0.7962	0.8192	0.8192	1.0000	0.6154
Ком.Воля	1.0000	0.9153	1.0000	0.6695	0.6695	0.3347	1.0000
Орг.Сп.	1.0000	1.0000	0.8962	0.6923	0.7423	0.3346	0.3346
Пси.Кач.	1.0000	1.0000	0.8273	0.8955	0.7364	0.3318	0.3318
Творч.	1.0000	0.8734	1.0000	1.0000	1.0000	0.4937	1.0000
Сумма парных произведений	1 (2.0021)	2 (1.8340)	3 (1.6197)	4 (1.3385)	5 (1.2655)	7 (0.5064)	6 (0.8195)

*Шаг 3.* Происходит выбор составляющих множества У1 и переход на следующий шаг. В случае несоответствия заданному множеству происходит дальнейшая проверка и выполнение программы при совпадении, в противном случае – вывод сообщения «Ошибка ввода» и возврат к шагу 1 для корректного ввода значений.

*Шаг 4.* Введенные значения сравниваются с набором диапазонов  $\{\Delta_1 \dots \Delta_{14}\}$  (табл. 2), которые хранятся в базе данных, а по сути своей являются данными шкал оценок психологических тестов, и определяется уровень каждой составляющей ПЛК. Если введенная величина некорректна, то программа выдает сообщение «Ошибка ввода» и возвращается к шагу 1 для корректировки ввода значений.

*Шаг 5.* Расчет оценок отдельной составляющей ПЛК и ПЛК в целом для каждой группы осуществляется в соответствующем подмодуле (РО-У1, РО-У2, РО-У3). Рассмотрим работу подмодуля РО-У1 для набора значений У1, указанных в выражении (5), работа остальных подмодулей для РО-У2 и РО-У3 идентична.

Для количественной оценки, в зависимости от интерпретации психологом результатов диагностики, каждому уровню тестируемой составляющей качества выставляется оценка «удовлетворительно», «хорошо» или «отлично» (неудовлетворительная оценка априори не рассматривалась, так как кандидаты с данной оценкой не принимаются на военную службу), а затем каждой составляющей ПЛК присваивается определенный балл  $\mu_{1..14}$ .

*Шаг 6.* После запроса из базы данных весовых коэффициентов  $\xi_{1..14}$  с помощью уравнения (2) производится расчет оценок конкретной составляющей ПЛК  $\Theta_{\Psi_1.. \Psi_{14}}$ , а по формулам (3) определяется оценка конкретного ПЛК  $\Omega_{1..5}$ .

*Шаг 7.* На данном этапе с помощью выражения (4) вычисляется интегральная оценка ПЛК  $\Upsilon$ .

В дальнейшем анализ оценок  $\Omega_{1..5}$  позволяет сделать вывод о преимущественном развитии того или иного ПЛК. А интегральная оценка ПЛК  $\Upsilon$ , вычисляемая по формуле (1), используется при формулировании выводов о степени сформированности профессиональных компетенций у курсанта.

Результаты вычислений, оценка конкретного ПЛК  $\Omega_{1..5}$  и интегральная оценка ПЛК  $\Upsilon$  записываются в базу данных и визуализируются в виде лучевых диаграмм, используя подход, изложенный в работе [24].

Лучевая диаграмма представляет собой совокупность лучей (по числу свойств сравниваемых объектов), на каждом из которых откладываются метки одного из нормализованных показателей. Метки разных объектов соединяются линиями различного цвета (структуры). Образованные ими многоугольники позволяют с предельной наглядностью выполнить многоаспектное сопоставление совокупности составляющих ПЛК (рис. 1).

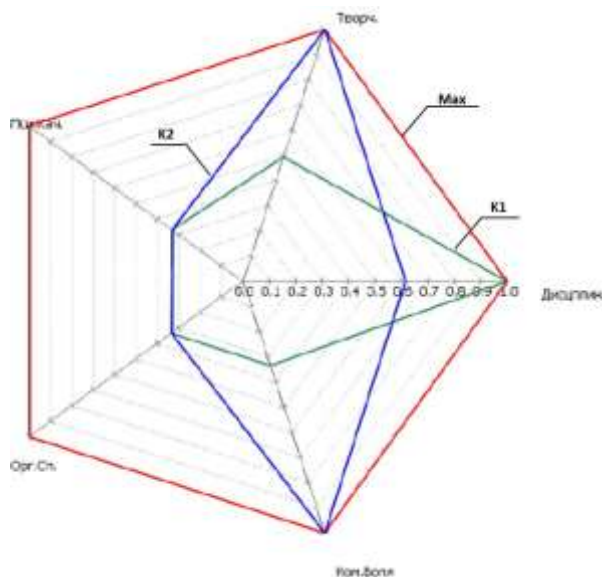


Рис. 1. Лучевые диаграммы ПЛК разных курсантов (K1, K2) в сравнении с их максимальными значениями

Анализ полученных диаграмм позволит сделать вывод о сформированности определенных ПЛК курсанта, необходимости коррекции того или иного качества и о применимости будущего выпускника в конкретном направлении офицерской деятельности. Например, в данном случае курсант K1 по присущим ему ПЛК (акцент на дисциплинированность) — хороший

исполнитель, а курсант *К2* с ярко выраженными командирской волей и творческими способностями раскроется на командных, инженерных или научных должностях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель и алгоритм оценивания ПЛК курсантов для СПО «Образование-МО» позволяют:

- проводить диагностирование ПЛК курсантов в соответствии с требуемой для офицера ВС РФ структурой ПЛК [20];
- осуществлять первоначальный прогноз предрасположенности курсанта к определенному виду офицерской деятельности;
- выполнять мероприятия, необходимые для поддержания и коррекции профессиональной траектории курсанта в соответствии с диагностированными ПЛК;
- организовывать прогнозирование оптимального распределения выпускника при назначении на первичную воинскую должность.

В дальнейшем полученные авторами результаты предполагается использовать при разработке программного модуля оценивания ПЛК курсантов (ОПЛКК) для СПО «Образование-МО».

## Список используемых источников

1. Образование-МО – URL : <https://obr-mo.ru/about-us/> (дата обращения: 21.12.2023).
2. Романова Е. С., Гумарова Т. А. Применение специального программного обеспечения «Образование-МО» для организации образовательного процесса в военных вузах // Гуманитарные научные исследования. – 2022. – № 6. – URL : <https://human.snauka.ru/2022/06/50638> (дата обращения: 29.12.2023).
3. Большакова З. М., Тулькибаева Н. Н. Компетенции и компетентность // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Образование. Педагогические науки. – 2009. – № 4. – С. 13–19.
4. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года : Указ Президента Российской Федерации № 474 от 21.07.2020. – URL : <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45726> (дата обращения: 07.02.2024).
5. Коротяев А. С. Диагностика профессионально-личностных качеств курсантов военного вуза // Ярославский педагогический вестник. – 2020. – № 4 (115). – С. 53–62.
6. Сидоров И. А., Воронов С. А. Методы математической статистики в изучении технологии развития управленческой компетенции курсантов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2020. – № 4. – С. 120–125.
7. Чернов И. В., Фейзов В. Р. Сценарные модели на основе цифрового портрета человека – URL : <https://mlsd2022.ipu.ru/proceedings/0988.pdf> (дата обращения: 17.03.2024).
8. Мерзвинская Л. В., Наумчик Е. Е., Яккола А. Н. Методика оценивания качества подготовки выпускников Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 686. – С. 231–237.
9. Солохин А. В. Совершенствование профессионально-личностных качеств офицеров – руководителей инженерно-авиационной службы в процессе повышения квалификации // Ярославский педагогический вестник. – 2021. – № 4 (121). – С. 50–56.
10. Воронов С. А., Бережнова Л. Н. Сущность и содержание педагогической диагностики компетенций // Вестник ВГУ. Сер.: Проблемы высшего образования. – 2018. – № 1. – С. 39–42.

11. Балабанов М. А., Лобжа М. Т. Методика контроля профессиональных способностей курсантов в вузе ГПС на основе автоматической обучающей системы // Психолого-педагогические проблемы безопасности человека и общества. – 2011. – № 4 (13). – С. 71–77.
12. Курдин Д. А. Создание искусственной нейронной сети, основанной на данных психологических обследований личностных качеств курсантов // Психология и педагогика служебной деятельности. – 2021. – № 2. – С. 51–58.
13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015613182. Программный комплекс автоматизации профессионального отбора военных специалистов «Отбор-В» / Ю. Б. Елгин, Р. Б. Игнатъев, Е. В. Медведев, С. Ф. Павлов, О. А. Теплова. – Заявл. 06.03.2015, опубл. 20.04.2015.
14. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 201966193. Программная модель оценивания профессионально важных качеств личности (модифицированная «карта личности» К. К. Платонова) / Ю. Н. Попова, Е. С. Орехова, Р. Е. Кузнецов, С. А. Мухтаров. – Заявл. 27.08.2019, опубл. 11.09.2019.
15. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023661676. Интеллектуальный помощник управления человеческим капиталом. Модуль синтеза образовательной траектории / Д. Ю. Евсюков, В. А. Ломазов, В. И. Ломазова, О. С. Акупиян, Д. П. Кравченко, З. С. Полякова. – Заявл. 18.05.2023, опубл. 01.06.2023.
16. Пат. RU 2383303 С1. Способ выявления особенностей личности / Мурашев П. М., Мурашева Г. Н., Родионов Д. В. – № 2008136453/14 ; заявл. 10.09.2008 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7. – 6 с.
17. Пат. RU 2277856 С2. Способ оценки психологических особенностей личности / Щедрин Д. С. – № 2004115768/14 ; заявл. 24.05.2004 ; опубл. 10.11.2005, Бюл. № 6. – 3 с.
18. Свид. о регистрации базы данных № 2022620278. База данных «Методика для оценки ценностных ориентаций личности» / Т. В. Капустина, Р. В. Кадыров, В. В. Коренчук. – Заявл. 27.01.2022, опубл. 04.02.2022.
19. Баширцев В. П., Касавцев М. Ю. Методика формирования лидерских качеств военнослужащих в условиях повседневной деятельности // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2017. – Вып. 659. – С. 184–193.
20. Военно-профессиональные качества. – URL : [http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12822%40 morfDictionary](http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12822%40%20morfDictionary) (дата обращения: 17.02.2024).
21. Баширцев В. П., Касавцев М. Ю. Противоречия формирования личностных качеств военнослужащих в процессе воинского воспитания при повседневной деятельности: состояние, пути и способы оптимизации // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 381–389.
22. Касавцев М. Ю., Войцеховский С. В., Дулишкин Р. М. Модель и алгоритм определения рейтинговой оценки показателей основных направлений деятельности курсанта для специального программного обеспечения «Образование-МО» // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2023. – Вып. 4. – С. 3–15.
23. Автоматизированное рабочее место военного психолога 83т379 (АРМ ВП 83т379). – URL : <http://www.multipsychemetr.ru/izdel/armvp> (дата обращения: 17.05.2024).
24. Лохвицкий В. А., Рыжиков Ю. И., Фоминов И. В. Многокритериальное оценивание качества измерителей угловых скоростей космических аппаратов на основе лучевых диаграмм // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2018. – Вып. 2. – С. 11–23.

А. Г. Басыров,  
*доктор технических наук, профессор;*  
Ф. Факхро

## **МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ**

Описана модель информационного обмена, учитывающая временные и энергетические затраты на реализацию информационных процессов анализа и передачи данных в распределенных информационных системах. Сформулирована постановка задачи и введены показатели качества ресурсосберегающего информационного обмена. Рассмотрены стратегии рациональной организации информационных процессов анализа и передачи данных, в том числе на основе распараллеливания этих процессов. Постановка задачи и модель ресурсосберегающего информационного обмена проиллюстрированы примерами.

Ключевые слова: распределенная обработка информации, неопределенность, ресурсосберегающий обмен, стратегии анализа и передачи данных.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время широко применяются распределенные информационные системы (ИС) сбора и обработки информации. При этом элементы ИС, реализующие сбор информации (клиенты), могут быть удалены на значительные расстояния от ее элементов, реализующих обработку собранных данных (серверы), т. е. функционировать автономно.

Примерами таких ИС могут быть многоагентные информационные системы [1, 2], клиент-серверные приложения [3], робототехнические комплексы [4], автоматизированные системы на основе беспилотных летательных [5], космических и подводных аппаратов и др.

Если ИС функционирует в режиме реального времени при ограниченном энергоресурсе ее элементов сбора информации и (или) деструктивных воздействиях на каналы передачи данных [6], то нередко возникает проблема рационального использования ограниченного объема времени и энергоресурса для передачи значительного объема собранной информации.

Под качеством информации будем понимать ее синтаксическую, семантическую или прагматическую (по Шенону) пригодность для использования по назначению.

Априорная неопределенность качества информации заключается в том, что ее пригодность не может быть установлена до выполнения процедур анализа этой информации.

После сбора информации элементом-клиентом она может быть передана на элемент ИС, осуществляющий ее обработку (сервер), например, в центр обработки информации (ЦОД). При существенных временных и энергетических ограничениях возникает проблема невозможности своевременной передачи всей собранной информации в ЦОД. Поэтому в процессе получения целевой информации после ее сбора нередко проводят ее предварительную обработку с целью отсева непригодной для дальнейшего использования части информации. Предварительная обработка информации может осуществляться, например, для уменьшения трафика передачи данных по каналам связи или с целью уменьшения затрат на ее окончательную обработку. Количество предварительно обрабатываемых блоков данных (БД) может составлять единицы и даже десятки тысяч, что определяется характером целевой информации.

Обычно предварительной обработке подвергается все множество БД. На практике число непригодных к дальнейшей обработке БД может быть значительно меньше числа пригодных, поэтому при предварительной обработке всего множества БД нерационально используются временные и энергетические ресурсы на их проверку. Если же данные передавать без пред-



варительной обработки, а впоследствии окажется, что доля непригодных БД велика, то ресурс на перечачу данных будет потрачен напрасно.

Отсюда возникает необходимость обоснованного компромисса между объемом проверяемых и передаваемых БД при ресурсных ограничениях (временных, энергетических и т. д.) на реализацию информационных процессов по обмену данными.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

Дано: множество  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$  блоков данных, размещенных на объекте  $O_1$  с признаками пригодности  $\pi(b_i)$ , где  $\pi(b_i) \in \{0,1\}$ ,  $i=1, \dots, N$ , причем если  $\pi(b_i) = 1$ , то блок считается пригодным, в противном случае – дефектным. Априори значения признаков блоков неизвестны, что позволяет считать признаки  $\pi(b_i)$  пригодности блоков случайными величинами до их проверки.

Требуется: найти управление  $U$  информационным процессом выбора из множества  $B$  блоков данных, находящихся на объекте  $O_1$ , подмножества  $\mathcal{B} \subseteq B$  и передачи этих блоков на объект  $O_2$  такое, что

$$U^*(B) = \underset{\mathcal{B} \subseteq B}{\text{Arg max}} g(U(\mathcal{B})),$$

где  $g(\mathcal{B}) = \sum_{b_j \in \mathcal{B}} \pi(b_j)$  – показатель качества информационного обмена, выражающийся количеством пригодных БД, переданных объектом  $O_1$  на объект  $O_2$ .

Это управление определяется при следующих ограничениях:

1)  $\text{card}(\mathcal{B}) \leq N$ ;

2)  $r(U) \leq R^{\text{доп}}$ , где  $r(U)$  – ресурс, затраченный на управление информационным процессом, т. е. на проверку и передачу БД, а  $R^{\text{доп}}$  – имеющийся ресурс на информационный обмен.

Если учитывается множество ресурсов (ресурсы различного вида), то ограничения в постановке задачи примут вид

$$r_i(U) \leq R_i^{\text{доп}}, i = 1, \dots, v,$$

где  $v$  – количество видов учитываемых ресурсов;

$r_i, R_i^{\text{доп}}$  – имеющийся и допустимый ресурсы  $i$ -го типа на информационный обмен соответственно.

Под управлением  $U = (u_1, u_2, \dots)$  информационным процессом будем понимать проверку БД и их передачу. Пример такого управления показан на рис. 1.

Пусть на объекте  $O_1$  собраны 10 БД (рис. 1,а), признаки пригодности которых априорно неизвестны (рис. 1,б). Пусть на проверку одного БД требуется одна единица ресурса, а на передачу – две, при этом в наличии имеется 15 единиц ресурса. Это ограничение позволяет реализовать множество вариантов управления информационным обменом, например:

–  $U = (0,0,0,0,0,0,0)$  – передать без проверки  $\mu = 7$  БД, что для заданных исходных данных обеспечит результативность информационного процесса, равную 3;

–  $U = (1,1,1,1,1,1,1,1)$  – проверить  $\eta = 9$  БД, передать три пригодных из проверенных, что в итоге обеспечит результативность информационного процесса, также равную 3;

–  $U = (1,1,1,1,1,0,0,0)$  – проверить  $\eta = 5$  БД (выделены серым фоном), передать два пригодных из проверенных и  $\mu = 3$  непроверенных (рис. 1,в), что, в итоге, обеспечит результативность информационного процесса, равную 4 (рис. 1,г).

0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
а)									
?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
б)									
0	0	1	1	0	?	?	?	?	?
в)									
-	-	1	1	-	1	0	1	-	-
г)									

Рис. 1. Пример информационного процесса в условиях неопределенности информации о пригодности БД:

*а* – значения пригодности БД; *б* – априорная информация о пригодности БД;  
*в* – информация о пригодности БД после проверки части ( $\eta=5$ ) БД, передача  $\mu=5$  БД;  
*г* – апостериорная информация о пригодности полученных БД

Таким образом, возникает задача выбора оптимального управления информационным обменом в условиях априорной неопределенности [7, 8] качества информации и ресурсных ограничений, решение которой требует обоснованного подхода к управляемому выбору, анализу и передаче собранных данных.

## МОДЕЛЬ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

В соответствии с поставленной выше задачей рассмотрим два взаимно удаленных объекта  $O_1$  и  $O_2$  распределенной информационной системы, первый из которых (клиент) собирает информацию и передает ее на второй (сервер).

Пусть после сбора информации на объекте  $O_1$  находится множество  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$  блоков данных.

Это множество  $B$  можно представить совокупностью трех непересекающихся подмножеств  $B = \mathcal{B}_\eta \cup \mathcal{B}_\mu \cup \Omega$ , где  $\mathcal{B}_\eta$  – подмножество БД, которые подлежат проверке и передаче с объекта  $O_1$  на объект  $O_2$  в случае их пригодности,  $\mathcal{B}_\mu$  – подмножество БД, передаваемых без проверки,  $\Omega$  – подмножество непроверяемых и непередаваемых БД. Два первых подмножества можно объединить в множество  $\mathcal{B} = \mathcal{B}_\eta \cup \mathcal{B}_\mu$  БД, над которыми реализуется управление информационным обменом (рис. 2).

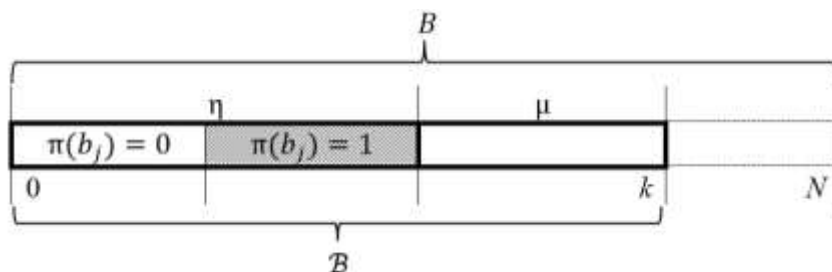


Рис. 2. Схема распределения блоков данных

Каждый блок  $b_i$  характеризуется признаком  $\pi(b_i)$  пригодности для использования, где  $\pi(b_i) \in \{0,1\}$ ,  $i=1, \dots, N$ . Если  $\pi(b_i) = 1$ , то блок считается пригодным, в противном случае – непригодным (дефектным), причем априори значения этих признаков неизвестны.

Пусть для определения значения (проверки) признака  $\pi(b_i)$  блока данных  $b_i$  требуется ресурс в объеме  $r_t$ , а для передачи одного блока данных – ресурс в объеме  $r_s$ .

Требуется передать максимально возможное количество  $g$  пригодных блоков с объекта  $O_1$  на объект  $O_2$  при ограниченном ресурсе  $R^{\text{доп}}$  на их проверку и передачу с учетом априорной неопределенности значений признаков блоков.

Другими словами, необходимо найти подмножество  $\mathcal{B} \subseteq B$ , при котором показатель качества  $g$  информационного процесса принимает максимальное значение.

Значение  $R$  требуемого ресурса на реализацию информационного процесса (проверки и передачи данных) может быть описано выражением

$$R = \eta r_t + r_s \left( \sum_{b_i \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_i) + \mu \right),$$

где  $\eta$  – количество проверенных блоков;

$\mu$  – количество переданных без проверки блоков.

$\sum_{b_i \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_i)$  – количество проверенных блоков, оказавшихся по результатам проверки исправными.

Отметим, что  $\text{card}(\mathcal{B}) = \eta + \mu = k$ .

Показатель  $g(\mathcal{B})$  может быть выражен как абсолютной величиной в интервале от 0 до  $N$ , определяемой общим количеством пригодных выбранных и переданных блоков данных:

$$g(\mathcal{B}) = \sum_{b_j \in \mathcal{B}} \pi(b_j),$$

так и относительной величиной в интервале от 0 до 1, определяемой отношением количества переданных пригодных БД к общему количеству пригодных блоков:

$$g(\mathcal{B}) = \frac{1}{\omega} \sum_{b_j \in \mathcal{B}} \pi(b_j), \quad (1)$$

где  $\omega = \sum_{j=1}^N \pi(b_j)$  – общее количество пригодных блоков.

При  $\omega = 0$ , т. е. при отсутствии пригодных БД, будем полагать  $g(U(\mathcal{B})) = 0$ .

Значение показателя  $g(\mathcal{B})$  зависит от значения признаков  $\pi(b_i)$  блоков данных, включенных в подмножество  $\mathcal{B}$ , от количества проверенных и количества переданных БД.

Так как значения признаков блоков данных априори неизвестны, для их определения необходимо провести проверку их состояния, потратив на это соответствующий ресурс.

Управление  $U$  информационными процессами проверки и передачи блоков данных в указанных выше условиях может быть описано вектором  $U = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ ,  $k = \eta + \mu$ ,  $k \leq N$ , задающим порядок проверки и(или) передачи блоков данных, входящих в подмножество  $\mathcal{B}$ , где  $u_i$  – действие с блоком данных  $b_i$ :

$$u_i = \begin{cases} 1 - \text{проверить БД } b_i \text{ и, если } \pi(b_i) = 1, \text{ то передать его с объекта } O_1 \text{ на} \\ \text{объект } O_2, \text{ иначе – не передавать;} \\ 0 - \text{передать } b_i \text{-й БД без проверки.} \end{cases} \quad (2)$$

Количество  $k$  элементов вектора  $U(\mathcal{B})$  определяется количеством  $\eta$  проверенных и количеством  $\mu$  переданных без проверки блоков, входящих в множество  $\mathcal{B}$ .

Значение управляющей переменной  $u_i$  определяют затраты  $R_i$  на проверку и(или) передачу одного  $b_i$ -го БД:

$$R_i = u_i \cdot (r_t + r_s \cdot \pi(b_i)) + (1 - u_i) \cdot r_s.$$

Рассмотрим в качестве примера три варианта управления  $U_1, U_2, U_3$  информационным процессом (табл. 1) над множеством из восьми БД при условии наличия  $R^{\text{доп}} = 5$  единиц ресурса и потребных затрат ресурса на передачу одного БД в размере  $r_s = 1$  единицы и затрат на проверку одного БД –  $r_t = 0,25$  единицы:

$U_1 = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5) = (0, 0, 0, 0, 0)$  – передача пяти БД без проверки;

$U_2 = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6) = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$  – проверка шести БД с последующей передачей трех из них (пригодных);

$U_3 = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7) = (1, 0, 0, 1, 1, 0, 1)$  – проверка четырех (первого, четвертого, пятого и седьмого) БД с последующей передачей одного из них (пригодного) и передача без проверки трех БД.

Количество элементов в кортежах управления  $U_1, U_2, U_3$  определяется требуемыми  $r(U_1), r(U_2), r(U_3)$  ресурсами и ограничено их допустимыми  $R_{\text{доп}}$  затратами.

При реализации этих вариантов управления результативность информационного процесса при первом варианте составляет 2 единицы, при втором – 3, при третьем – 4.

Несложно заметить влияние порядка выбора БД для передачи (проверки).

Таблица 1

Пример вариантов управления информационным процессом

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8		$r$	$g(U(\mathcal{B}))$
$\pi(b_i)$	0	1	1	0	0	1	1	0			
$U_1$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-	-	-			
$r(U_1)$	1	1	1	1	1	-	-	-		5	2
$U_2$	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-	-			
$r(U_2)$	0,25	1,25	1,25	0,25	0,25	1,25	-	-		4,5	3
$U_3$	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	-			
$r(U_3)$	0,25	1	1	0,25	0,25	1	1,25	-		5	4

Пусть набор БД проверяется в порядке следования номеров БД: 1, 2, 3, ... .

Тогда, используя выше представленные обозначения, модель ресурсосберегающего информационного обмена можно представить кортежем

$$\mathcal{M} = \langle B, \mathcal{B}, \pi(b_i), r_t, r_s, R, U, \eta, \mu \rangle,$$

- где  $B$  – множество блоков данных,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ ;  
 $\mathcal{B}$  – подмножество блоков данных, выбранных для проверки/передачи;  
 $\pi(b_i)$  – пригодность (априорно неизвестная)  $i$ -го блока,  $b_i \in B$ ;  
 $U$  – вектор управления (2),  $U = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ ,

при ограничении

$$\eta r_t + r_s \left( \sum_{b_i \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_i) + \mu \right) \leq R,$$

где  $\eta = \text{card}(\mathcal{B}_\eta) = \sum_{b_i \in \mathcal{B}} u_i$ ;

$\mu = \text{card}(\mathcal{B}_\mu) = \sum_{b_i \in \mathcal{B}} (1 - u_i)$ .

## СТРАТЕГИИ АНАЛИЗА И ПЕРЕДАЧИ БЛОКОВ ДАННЫХ

Рассмотрим следующие возможные стратегии анализа и передачи блоков данных [9].

*Стратегия 1.* Передаются только проверенные БД, оказавшиеся по результатам проверок пригодными ( $\mu = 0$ ).

*Стратегия 2.* БД передаются без проверки ( $\eta = 0$ ).

*Стратегия 3.* Передаются проверенные БД, оказавшиеся по результатам проверок пригодными, остальные БД передаются без проверки ( $\eta \geq 0, \mu \geq 0$ ).

Во всех стратегиях учитывается достаточность ресурса на проверку и передачу БД.

Отметим, что задача определения рациональной стратегии анализа и передачи блоков данных имеет смысл только в случае, когда затраты на проверку  $r_{t_1}$  одного БД клиентом

меньше суммарных затрат на его передачу и проверку  $r_{t_2}$  сервером, т. е. при  $r_{t_1} < r_{t_2} + r_s$ . В противном случае предварительная проверка БД нецелесообразна.

Значение показателя качества  $g(U(\mathcal{B}))$  решения задачи при реализации *второй* и *третьей стратегий* может быть определено только после завершения процесса передачи блоков данных и анализа на принимающей стороне (сервере) полученной информации на ее пригодность. При реализации же *первой стратегии* значения этих показателей могут быть определены до передачи блоков данных.

Также нетрудно заметить, что первая и вторая стратегии являются частным случаем третьей стратегии (при нулевом значении  $\eta$  или  $\mu$ ).

Формализуем управление  $U = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ ,  $k \leq N$ , информационными процессами проверки и передачи блоков данных (2) для трех представленных стратегий анализа и передачи блоков данных.

Для стратегии 1:  $u_i = 1$ ,  $i \leq \eta$ , где  $\eta$  находится из уравнения  $\left\lceil \eta r_t + r_s \sum_{b_j \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_j) \right\rceil = R^{\text{доп}}$ .

Для стратегии 2:  $u_i = 0$ ,  $i \leq \lfloor R/r_s \rfloor$ . Здесь выражение  $\lfloor x \rfloor$  означает «ближайшее целое, меньшее или равное  $x$ ».

Для стратегии 3:  $u_i = 1$  при  $b_i \in \mathcal{B}_\eta$  и  $u_i = 0$  при  $b_i \in \mathcal{B}_\mu$ , где  $\eta, \mu$  удовлетворяют неравенству  $\eta r_t + r_s \left( \mu + \sum_{b_j \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_j) \right) \leq R^{\text{доп}}$ .

### ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ СТРАТЕГИЙ АНАЛИЗА И ПЕРЕДАЧИ БЛОКОВ ДАННЫХ

Пусть клиентом ИС собрано 10 файлов – фотоснимков объекта наблюдения. Вектор пригодности этих файлов, значение которого априорно неизвестно, составляет  $(0,0,1,1,0,1,1,1,1,0)$ , т. е. из 10 файлов первый, второй и десятый – дефектные. Временные затраты на проверку одного файла составляют 1 минуту, а передачи с клиента на сервер – 2 минуты. Рассмотрим три алгоритма управления информационным процессом обмена данными, реализующие вышеотмеченные стратегии анализа и передачи блоков данных при ограничениях на оперативность проверки и передачи файлов в размере 10 минут (рис. 3).



Рис. 3. Пример стратегий анализа и передачи блоков данных

Результативность информационного процесса будем оценивать количеством переданных на сервер пригодных файлов.

*Стратегия 1.* Проверяются все файлы и передаются только оказавшиеся по результатам проверок пригодными. Результативность информационного процесса равна 2, так как будут проверены первые пять файлов за 5 минут и переданы файлы (пригодные) с номерами 3 и 4 за 4 минуты.

*Стратегия 2.* Файлы передаются без проверки. Результативность информационного процесса равна 3, так как будут без проверки переданы первые пять файлов за 10 минут, из которых три (с номерами 3, 4 и 5) окажутся пригодными.

*Стратегия 3.* Проверка части файлов. Проверяются два файла за 2 минуты, которые по результатам проверки оказываются непригодными и не передаются. Следующие четыре файла передаются за 8 минут без проверки (предполагаются тоже пригодными). Результативность информационного процесса равна 4, так как будут переданы четыре пригодных файла с номерами 3, 4, 5 и 6.

Таким образом, выбор стратегии и последовательности анализа и передачи блоков данных влияют на результативность информационного процесса обмена данными. Формально это сводится к формированию подмножеств  $\mathcal{B}_\eta$  и  $\mathcal{B}_\mu$  исходного множества БД с учетом ресурсных ограничений на информационный обмен.

### МОДЕЛЬ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА НА ОСНОВЕ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ПРОЦЕССОВ АНАЛИЗА И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ ЭНЕРГОВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ

Пусть информационный обмен между клиентом и сервером протекает в условиях ограничений по времени и по энергоресурсу автономных источников питания клиента.

Тогда ограничения на ресурсы информационного процесса примут вид:

$$\begin{cases} r_1(U) \leq R_1^{\text{доп}}; \\ r_2(U) \leq R_2^{\text{доп}}, \end{cases}$$

где  $r_1$  – затраты времени (оперативность);  
 $r_2$  – затраты энергоресурса (энергоёмкость) информационного обмена;  
 $R_1^{\text{доп}}, R_2^{\text{доп}}$  – допустимые значения оперативности и энергоёмкости информационного обмена соответственно.

Оперативность информационного обмена можно повысить за счет совмещения во времени процессов анализа и передачи данных, т. е. распараллеливания этих процессов.

Так в этом случае пример информационного обмена в соответствии со стратегией 1 (см. рис. 3) можно проиллюстрировать рис. 4.

Стратегия 1	проверка	1	2	3	4	5	-	-	-	-
	передача	-	-	-	3		4		5	

*Рис. 4. Пример информационного обмена при параллельных процессах анализа и передачи блоков данных*

Как видно из примера, при распараллеливании процессов анализа и передачи данных результативность информационного обмена увеличилась на 1/3 (на один файл) по сравнению с исходным последовательным процессом.

Таким образом, значение  $r_1$  требуемого ресурса времени на реализацию параллельного информационного процесса проверки и передачи данных может быть описано выражением

$$r_1 = \max \left\{ \eta r_{1t}, r_{1t} + r_{1s} (\sum_{b_j \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_j) + \mu) \right\}.$$

Требуемый энергоресурс  $r_2$  на реализацию информационного процесса (проверки и передачи данных), как и в случае последовательных процессов, составит

$$r_2 = \eta r_{2t} + r_{2s} (\sum_{b_j \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_j) + \mu),$$

где  $r_{1t}, r_{1s}$  – затраты времени, а  $r_{2t}, r_{2s}$  – затраты энергоресурса на проверку и передачу одного БД соответственно.

Результативность информационного обмена при ограничениях

$$\begin{cases} \max \{ \eta r_{1t}, r_{1t} + r_{1s} (\sum_{b_j \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_j) + \mu) \} \leq R_1^{\text{доп}} \\ \eta r_{2t} + r_{2s} (\sum_{b_j \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_j) + \mu) \leq R_2^{\text{доп}} \end{cases}$$

в этом случае составит

$$g(U(\mathcal{B})) = \sum_{b_j \in \mathcal{B}_\eta} \pi(b_j) + \sum_{b_j \in \mathcal{B}_\mu} \pi(b_j),$$

где  $\text{card}(\mathcal{B}_\eta) = \eta$ ,  $\text{card}(\mathcal{B}_\mu) = \mu$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование форм и способов применения вооружения, военной и специальной техники на основе распределенных информационных систем военного назначения в современных условиях требует новых подходов к организации их функционирования в условиях ресурсных ограничений.

Жесткие требования по оперативности сбора и доставки целевой информации мобильными объектами в условиях ограничений бортовых источников питания и деструктивных воздействий, сокращающих пропускную способность каналов обмена, приводят к необходимости сокращения объема передаваемых данных за счет исключения информации, не дающей целевого эффекта.

Поставленная в статье задача относится к классу задач принятия решения в условиях неопределенности исходных данных, в рассматриваемом случае – пригодности для дальнейшего использования собранной информации, и близка по своей постановке к задачам статистического контроля по альтернативному признаку [9].

Научная новизна представленной модели заключается в том, что она, в отличие от известных [10, 11], формирует стратегию организации информационного обмена с учетом априорной неопределенности качества исходных данных, что позволяет минимизировать объем передаваемой информации. Практическая значимость модели состоит в способности обеспечить требуемую оперативность решения целевых задач с применением мобильных агентов на основе минимизации потерь производительности информационных процессов.

Для решения поставленной задачи с использованием предложенной модели распределенного ресурсосберегающего информационного обмена в условиях априорной неопределенности качества информации необходима разработка алгоритма оптимизации объемов анализируемой и передаваемой информации с учетом соответствующих рисков, связанных как с пропуском непригодных блоков данных, так и с «лишними» ресурсными затратами на проверку «полезной» информации.

## Список используемых источников

1. Прикладные многоагентные системы группового управления / В. И. Городецкий [и др.] // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 2. – С. 3–24.
2. *Малыхина М. П., Герасимов Д. А.* Мультиагентные системы искусственного интеллекта // Научные труды КубГТУ. – 2018. – № 3. – С. 476–483.
3. *Лиманова Н. И., Селезнев И. А.* Анализ эффективности клиент-серверной архитектуры // Бюллетень науки и практики. – 2022. – Т. 8, № 8. – С. 392–396.
4. *Юревич Е. И.* Основы робототехники : учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2017. – 284 с.

5. Беспилотные аппараты, их электромагнитная стойкость, математические модели систем стабилизации : моногр. / В. А. Крамарь [и др.]. – М. : ИНФРА-М, 2021. – 180 с.
6. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1 : Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 1. – С. 109–146.
7. Перепелица В. А., Тебуева Ф. Б. Дискретная оптимизация и моделирование в условиях неопределенности данных : моногр. // Российская Академия Естествознания : сайт. – URL : <http://www.rae.ru/monographs/22> (дата обращения: 14.05.2024).
8. Шилов А. В. Методы снятия неопределенности при принятии прогнозных решений // Фундаментальные и прикладные исследования. – 2015. – № 19. – С. 111–115.
9. Гусев А. Л. Методы непрерывного статистического контроля : учеб. пособие. – Пермь : ПГНИУ, 2021. – 89 с.
10. Басыров А. Г., Лупашко М. Н., Степанов И. В. Стратегия организации информационных процессов в автономных подвижных объектах на основе минимизации энерговременных затрат // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2021. – № 2. – С. 45–48.
11. Басыров А. Г., Кузнецов В. В., Лупашко М. В. Алгоритмы ресурсосберегающего автономного контроля массива данных наблюдения в беспилотных летательных аппаратах // Вестник Российского нового университета. Сер. : Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2022. – Вып. 3. – С. 3–10.



Д. Ю. Казьмин;  
С. В. Пилькевич,  
*доктор технических наук, доцент*

## **ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

Рассматривается построение модели прогнозирования процесса проведения негативного (деструктивного) воздействия в условиях конфликта взаимодействующих информационных систем. В основу прогнозирования положен субъектно-объектный подход, позволяющий получить оценки продолжительности проведения негативного воздействия посредством применения общего математического аппарата марковских случайных процессов.

Ключевые слова: прогнозирование, негативное (деструктивное) воздействие, объекты информационной инфраструктуры.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Значительное число исследований в области информационной безопасности посвящено совершенствованию технической и программной составляющей систем защиты. Большой вклад в развитие теории моделирования защищенных информационных инфраструктур, на базе которых строятся современные системы телекоммуникаций, внесли работы П. Д. Зегжды, И. В. Котенко, С. Фабендер, Дж. Чжан, К. Цзэн. В то же время вопросы моделирования систем, оказывающих негативные воздействия, и методы прогнозирования их применения, как правило, заменяются на исследования моделей нарушителя, разработки которых связаны с применением нормативно-паровой документации и метода экспертных оценок. Однако анализ применимости результатов перечисленных работ не позволяет в полной мере решить задачу прогнозирования развития информационных процессов в ходе указанных воздействий в условиях активного применения атакуемой стороной средств защиты информации.

Выбор темы исследования обусловлен актуальностью задачи, которая состоит в необходимости прогнозирования развития процессов в ходе оказания деструктивных воздействий на защищаемые информационные инфраструктуры соперничающей стороны с учетом требуемых ресурсов и возможной продолжительности оказания такого рода воздействий. Наиболее перспективным путем поиска решения является разработка научно-методического аппарата для получения прогнозных оценок искомых характеристик атаки. В настоящей работе рассматриваются различные подходы к решению этой задачи и предложена модель для получения вероятностных оценок продолжительности описанных процессов в условиях противопоставления атакующим защитных мер.

### **ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Прогнозирование состояния субъекта и объекта сетевой инфраструктуры, оказывающих взаимное воздействие, представляет сложную задачу, от успешного решения которой напрямую зависят возможность получения и уровень качества прогнозных оценок. Многообразие состояния объектов информационно-телекоммуникационной сети, факторов воздействия, условий эксплуатации и различный характер воздействия на них вызывают неизбежную многовариантность исходов.

Рассмотрим основные принципы, цели и задачи прогнозирования для выбора модели прогнозирования, адекватно описывающей процесс оказания негативных (дезорганизирующих) воздействий, и выбора наиболее предпочтительного метода для получения оценок о состоянии объекта прогнозирования в будущем. В силу специфичности задачи и ограниченного количества исследований в данной области, декомпозируем задачу и рассмотрим отдельно прогнозные модели и модели воздействия.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Прогнозирование как элемент управления представляет собой информационный процесс, который включает в себя анализ потоков информации о прошлом (ретроспективной информации) для получения потоков информации о будущем (перспективной информации). Этот процесс также учитывает информацию о текущем состоянии объекта прогнозирования в момент разработки прогноза, что позволяет принимать более обоснованные решения. Графическое изображение процесса прогнозирования представлено на рис. 1.

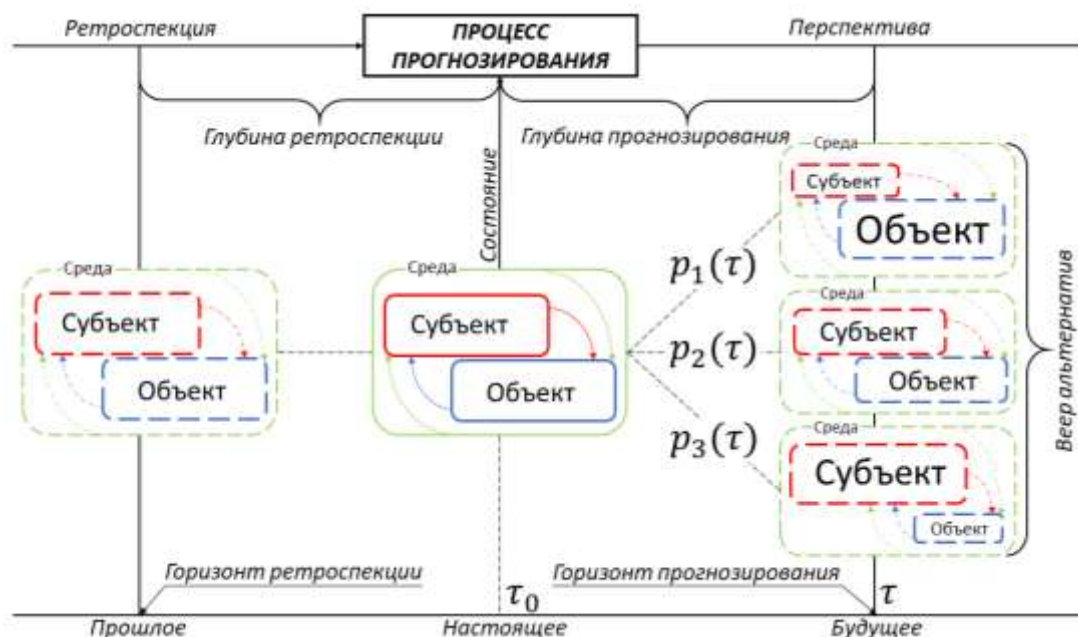


Рис. 1. Процесс прогнозирования

Время, на которое разрабатывается прогноз, называется глубиной прогнозирования. С увеличением срока прогнозирования возрастает необходимость более глубокого анализа прошлого, что приводит к увеличению временного сдвига между входной и выходной информацией прогнозного процесса.

Прогнозирование и планирование тесно связаны и являются составными частями единой системы планирования, объединенной общими целями и задачами. Прогнозирование является начальной стадией планирования, которая обеспечивает основу для принятия плановых решений. Основное различие между планированием и прогнозированием заключается в характере информации, которая предоставляется: плановая информация носит директивный характер и является обязательной для исполнения, в то время как прогнозная информация имеет ориентирующий характер и служит для принятия решений.

Приведем определения основных понятий теории прогнозирования [1].

**Прогноз** – это вероятностное суждение о состоянии какого-либо объекта (процесса или явления) в определенный момент времени в будущем и (или) альтернативных путях достижения каких-либо результатов.

**Прогнозирование** – это процесс формирования прогнозов развития объекта на основе анализа тенденций его развития.

Анализируя данные определения, отметим, что вырабатываемая в процессе прогнозирования перспективная информация носит вероятностный характер.

**Цель прогнозирования** – на основе анализа состояния и поведения системы (процесса) в прошлом и тенденций, влияющих на рассматриваемую систему (процесс) в настоящем, определить возможные ее (его) состояния в перспективе с указанием вероятностей этих состояний, раскрыть факторы, воздействующие на развитие ситуации, влияющей на состояние, в котором в итоге окажется система (процесс).

В теории прогнозирования решаются три ключевые задачи:

- 1) определение перспективного развития объекта прогнозирования;
- 2) выбор наиболее оптимальных стратегий и тактик для достижения целей;
- 3) выявление необходимых ресурсов для реализации поставленных задач.

Сформулируем цель прогнозирования развития процессов в условиях дезорганизующих воздействий: определить продолжительность воздействия, осуществляемого посредством атаки типа «распределенный отказ в обслуживании» в условиях предположения об адекватности оценок применяемых атакующих сил и средств.

Согласно теории прогнозирования, прогнозирование осуществляется с помощью прогнозного моделирования и связано с необходимостью поиска адекватной модели, описывающей объект прогнозирования, и методов, позволяющих получать обоснованные результаты [1].

## **ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПРОГНОЗНЫМ МОДЕЛЯМ**

Прогнозная модель создается для изучения объекта прогнозирования и является рабочим отображением, точно описывающим изучаемое явление для получения сведений о его будущих показателях.

При конструировании и анализе прогнозной модели невозможно напрямую контролировать ее соответствие реальности, поскольку такая проверка должна относиться к будущим состояниям объекта. Неизвестно, какие трансформации могут произойти с ним к определенному моменту, методы конструирования прогнозных моделей и контроля их соответствия исследуемому объекту носят специальный характер, потому что в текущий момент объект либо не существует (например, проектируемый объект), либо существует.

К прогнозной модели предъявляются следующие требования:

1. Механизм интеграции посредством достаточно широкого спектра модификаций и дополнений должен обеспечивать возможность последовательного приближения к модели, удовлетворяющей исследователя по точности отражения объекта.

2. Чтобы вызывать сомнения в надежности и практической полезности полученных на ней результатов модель должна допускать варьирование большим числом переменных, но не быть настолько абстрактной.

3. Модель должна быть ориентирована на реализацию с помощью имеющихся сил и средств.

4. Модель должна обеспечивать получение полезной информации об объекте в плане поставленной задачи исследования.

5. Модель должна обеспечивать возможность проверки истинности, соответствия ее оригиналу.

Основная задача прогностической модели заключается в получении информации о будущих состояниях объекта, а не о его общих характеристиках.

Создание модели процессов негативного воздействия предполагает выбор подходящего математического инструментария для формулирования модели и построение модели, которая отражает возможные варианты структурно-функциональной организации информационной системы, реализующей негативное воздействие.

По сути, речь идет о модели потенциального нарушителя. Необходимо установить ее взаимосвязь с переменными и свойствами изучаемой системы и определить совокупность переменных и свойств модели в процессе конструирования модели в терминах выбранного математического инструментария, т. е. осуществить параметризацию модели [2].

## ОБЗОР МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Интуитивные и формализованные методы прогнозирования (рис. 2) делятся на две основные группы, которые отображены в аналитическом обзоре [3]. Первые применяются в случаях, когда объект прогнозирования чрезвычайно сложен или, наоборот, слишком прост. Это делает невозможным с помощью аналитических методов произвести учет внешних факторов. Интуитивные методы прогнозирования основаны на индивидуальных заключениях экспертов относительно перспектив развития процесса и не требуют разработки специальных моделей. Эти методы опираются на профессиональный опыт и интуицию специалистов. Они используются для анализа процессов, которые полностью или частично не могут быть сформулированы математически, т. е. для которых сложно разработать адекватную модель. К таким методам относятся предвидение по шаблону, исторические параллели и оценки экспертов. Следует отметить, что в настоящее время широко распространено использование экспертных систем, в том числе основанных на нечеткой логике [4]. В статье [5] можно найти более подробное описание интуитивных методов прогнозирования.



Рис. 2. Методы прогнозирования

На фактическом материале об объекте прогнозирования и его прошлом развитии основаны формализованные методы прогнозирования. К этой группе относятся продвинутые методы прогнозирования, количественные методы и методы аналогий. Продвинутые методы прогнозирования основаны на специальных принципах обработки информации, которые позволяют прогнозированию опережать развитие технологического прогресса. Количественные методы включают в себя комплекс методов обработки числовой информации об объекте прогнозирования, направленных на получение прогностических моделей и выявление математических закономерностей. Методы аналогий направлены на выявление сходства в закономерностях эволюции различных процессов и на основе этого сходства производят прогнозирование.

Формализованные методы рассматривают применительно к моделям прогнозирования. В обзоре [6] модели прогнозирования разделяются на системные и количественные модели.

Системные модели определяют функциональную связь между будущими и фактическими значениями, а также внешними факторами посредством структурного описания системы. К этой группе относятся модели на основе цепей Маркова, нейронные сети и модели на основе классификационно-регрессионных деревьев, которые позволяют учитывать сложные взаимосвязи между переменными.

Количественные модели прогнозирования характеризуются фактическими значениями прогнозируемых показателей объекта и аналитическим определением функциональной связи между будущими, а также внешними факторами. В эту группу входят автокорреляционные модели, корреляционные модели и модели экспоненциального сглаживания, которые позволяют выявить тенденции в данных и закономерности.

**Регрессионные модели.** Регрессионные модели широко применяются в различных сферах, включая управление и прогнозирование. Основная цель корреляционного анализа – выявить взаимосвязь между множеством внешних факторов (корреляторов) и исходной переменной. Коэффициенты корреляции могут быть определены с помощью метода максимального правдоподобия, а также с помощью метода наименьших квадратов [7]. Одним из простейших вариантов корреляционной модели является линейная корреляция, которая основана на предположении о наличии дискретного внешнего фактора  $X(t)$ , влияющего на исследуемый процесс  $Z(t)$ , с линейной связью между ними. Этот подход позволяет сделать прогнозы о его поведении и оценить влияние внешних факторов на процесс.

Модель прогнозирования на основе линейной регрессии описывается уравнением

$$Z(t) = \alpha_0 + \alpha_1 X(t) + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $\alpha_0, \alpha_1$  – коэффициенты регрессии;

$\varepsilon_t$  – ошибка модели.

Для получения прогнозных значений  $Z(t)$  в момент времени  $t$  необходимо иметь значение  $X(t)$  в тот же момент времени  $t$ , что редко выполнимо на практике.

**Авторегрессионные модели.** Данные модели основаны на предположении, что текущее значение процесса  $Z(t)$  линейно связано с его предыдущими значениями  $Z(t-1), \dots, Z(t-p)$ . Это означает, что для прогнозирования его будущего поведения может быть использовано поведение процесса в прошлом. Модель авторегрессии, в частности модель скользящего среднего, является одним из наиболее популярных инструментов в области анализа временных рядов [8, 9], поскольку она позволяет сделать прогнозы о его будущем поведении и выявить закономерности и тенденции в поведении процесса. Текущее значение процесса в этой модели формулируется как конечная линейная совокупность предыдущих значений процесса и импульса, который называется «белым шумом»:

$$Z(t) = C + \phi_1 Z(t-1) + \phi_2 Z(t-2) + \dots + \phi_p Z(t-p) + \varepsilon_t. \quad (2)$$

Формула (2) описывает процесс авторегрессии порядка  $p$ , здесь  $C$  – вещественная константа,  $\phi_1, \dots, \phi_p$  – коэффициенты,  $\varepsilon_t$  – ошибка модели. Для определения  $\phi_i$  и  $C$  используют метод наименьших квадратов [7] или метод максимального правдоподобия.

**Модели экспоненциального сглаживания.** Модели экспоненциального сглаживания, созданные в середине XX века, продолжают пользоваться популярностью и в наши дни, благодаря своей интуитивной ясности и доступности. Когда необходимо учитывать влияние свежих данных на прогнозные показатели эти модели применяются для имитации процессов с наблюдателем [10]. По мере поступления новых данных основная концепция экспоненциального сглаживания заключается в постоянном пересмотре прогнозных показателей, при

этом данным присваиваются экспоненциально убывающие коэффициенты по мере их устаревания. Это означает, что последние доступные данные оказывают более значительное влияние на прогнозное значение, чем более ранние данные. Функция модели выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} Z(t) &= S(t) + \varepsilon_t; \\ S(t) &= \alpha Z(t-1) + (1-\alpha)S(t-1), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент сглаживания,  $0 < \alpha < 1$ ; начальные условия определяются как  $S(1) = Z(0)$ . В данной модели каждое последующее сглаженное значение  $S(t)$  является взвешенным средним между предыдущим значением временного ряда  $Z(t)$  и предыдущим сглаженным значением  $S(t-1)$ .

**Нейросетевые модели.** В настоящее время нейросетевые модели являются одними из самых популярных структурных моделей, используемых для прогнозирования и анализа сложных систем [9]. Искусственные нейронные сети являются основой этих моделей, состоящих из множества взаимодействующих элементов. Каждый элемент можно охарактеризовать с помощью пары уравнений, которые определяют его функционирование и взаимосвязь с другими элементами в структуре, представленной следующим образом:

$$\begin{aligned} U(t) &= \sum_{i=1}^m \omega_i Z(t-i) + b; \\ Z(t) &= \varphi(U(t)), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $Z(t-1), \dots, Z(t-m)$  – входные сигналы;  
 $\omega_1, \dots, \omega_m$  – синаптические веса нейрона;  
 $b$  – порог;  
 $\varphi(U(t))$  – функция активации.

Ключевой элемент нейронных сетей – это функции активации. В нейронных сетях используются три основных типа функций активации [11]: сигмоидальная функция, кусочно-линейная функция и функция единичного скачка. Эти функции играют решающую роль в определении поведения нейронов и их взаимодействия с другими нейронами в сети. Архитектура нейронной сети определяется способом связи нейронов, который может быть различным. Согласно работе [11], нейронные сети можно классифицировать на три основные категории: однослойные сети прямого распространения, многослойные сети прямого распространения и рекуррентные сети. На рис. 3 представлена структура трехслойной нейронной сети прямого распространения, которая является одним из наиболее часто используемых типов нейронных сетей.

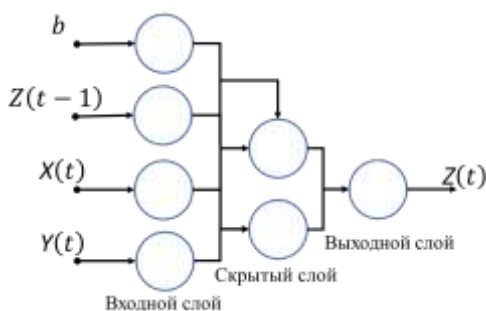


Рис. 3. Трехслойная нейронная сеть прямого распространения

распространения, которая является одним из наиболее часто используемых типов нейронных сетей.

Нейронные сети позволяют моделировать сложные нелинейные зависимости между будущими значениями системы и ее фактическими значениями, а также между системой и внешними факторами. Это достигается благодаря гибкой структуре сети и возможности выбора различных функций активации, которые определяют нелинейную зависимость между входными и выходными сигналами сети. Благодаря этому, нейронные сети могут эффективно моделировать сложные системы и процессы, которые невозможно описать с помощью линейных моделей.

**Модели на базе цепей Маркова.** Основанные на цепях Маркова модели прогнозирования предполагают, что будущее положение процесса определяется исключительно его текущим положением, без учета предыдущих положений [12]. Это означает, что моделируемые цепями Маркова процессы должны иметь кратковременную память, т. е. их поведение в будущем не зависит от их прошлого. Пример цепи Маркова для процесса с тремя положениями, которая демонстрирует эффективность и простоту этого подхода к прогнозированию, представлен на рис. 4.

Здесь  $S_1, \dots, S_3$  – состояния процесса  $Z(t)$ ;  $\lambda_{12}$  – вероятность перехода из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$ ;  $\lambda_{23}$  – вероятность перехода из состояния  $S_2$  в состояние  $S_3$  и т. д. При построении цепи Маркова определяется множество состояний и вероятности переходов. Если текущее состояние процесса  $S_i$ , то в качестве будущего состояния процесса выбирается такое состояние  $S_j$ , вероятность перехода в которое (значение  $\lambda_{ij}$ ) максимальна. Таким образом, структура цепи Маркова и вероятности перехода состояний определяют зависимость между будущим значением процесса и его текущим значением.

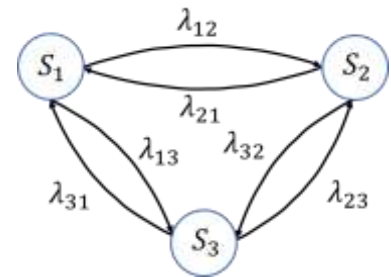


Рис. 4. Цепь Маркова с тремя состояниями

**Модели на базе классификационно-регрессионных деревьев.** Еще одну популярную структурную модель прогнозирования представляют собой классификационно-регрессионные деревья, позволяющие эффективно моделировать сложные системы, на которые влияют различные типы внешних факторов. Эти модели разработаны для учета как непрерывных, так и категориальных факторов, что делает их особенно полезными для прогнозирования процессов, таких как  $Z(t)$ , которые подвержены влиянию различных типов переменных. Необходимо учитывать, что в зависимости от типа внешних факторов можно использовать регрессионные деревья для непрерывных факторов, классификационные деревья для категориальных факторов или смешанные классификационно-регрессионные деревья для учета факторов обоих типов. Прогнозное значение временного ряда, как показано в представленной модели, определяется предыдущими значениями и дополнительными независимыми переменными.

Процесс начинается со сравнения предыдущего значения с константой  $Z_0$ , как на примере, изображенном на рис. 5.



Рис. 5. Бинарное классификационно-регрессионное дерево

Если значение  $Z(t-1)$  меньше  $Z_0$ , то выполняется следующая проверка:  $X(t) > X_{11}$ . Если неравенство не выполняется, то  $Z(t) > C_3$ , иначе проверки продолжаются до того момента, пока не будет найден лист дерева, в котором происходит определение будущего значения процесса  $Z(t)$ .

Как категориальные переменные  $Y$ , так и непрерывные переменные, такие как  $X(t)$ , учитываются при определении значений, для которых проверяется принадлежность к одному из предварительно определенных подмножеств. Такие значения пороговых констант, как  $Z_0$ ,  $X_{11}$ , и подмножества  $Y_{12}$ ,  $Y_{22}$  определяются на этапе обучения дерева. Таким образом, для моделирования зависимости будущей величины процесса  $Z(t)$  используются пороговые константы, структура дерева и подмножества.

## СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Проанализируем плюсы и минусы рассмотренных моделей и методов прогнозирования. При этом будем учитывать соответствующие им методы.

*Регрессионные модели.* Основными преимуществами этих моделей являются их простота, гибкость и единообразие анализа и проектирования. Линейные регрессионные модели позволяют быстро получать результаты прогнозирования, а также обеспечивают прозрачность моделирования.

Недостатком является то, что нелинейные регрессионные модели имеют сложности в определении вида функциональной зависимости и трудоемкости определения параметров модели. Линейные регрессионные модели также имеют низкую адаптивность и не могут моделировать нелинейные процессы.

*Авторегрессионные модели.* Основными преимуществами этих моделей считаются их простота и прозрачность моделирования. Они характеризуются как популярные и широко используются для решения задач прогнозирования процессов.

Недостаток заключается в том, что они имеют большое количество параметров модели, идентификация которых неоднозначна и ресурсоемка. Кроме того, они имеют низкую адаптивность и линейность, что ограничивает их способность моделировать нелинейные процессы.

*Модели экспоненциального сглаживания.* Основными преимуществами этих моделей служат их простота и единообразие анализа и проектирования.

Недостатком считается отсутствие гибкости.

*Нейросетевые модели.* Основным преимуществом этих моделей выступает их нелинейность, которая позволяет улавливать нелинейные зависимости между будущими и фактическими значениями процессов. Они также имеют адаптивность, масштабируемость и единообразие анализа и проектирования.

Недостатком является то, что они имеют недостатки в виде отсутствия прозрачности моделирования, сложности выбора архитектуры и алгоритма обучения, а также ресурсоемкости процесса их обучения.

*Модели на базе цепей Маркова.* Основными преимуществами этих моделей заключаются в их простоте и единообразии анализа и проектирования.

Недостаток модели состоит в отсутствии возможности моделирования процессов с длинной памятью.

*Модели на базе классификационно-регрессионных деревьев.* Однозначность процесса обучения дерева, быстрота и их масштабируемость, а также возможность использовать категориальные внешние факторы являются основными преимуществами этих моделей.



Недостатки модели характеризуются вопросом останова, неоднозначностью алгоритма построения структуры дерева и отсутствием единообразия их анализа и проектирования.

В табл. 1 систематизированы достоинства и недостатки этих моделей и методов.

Таблица 1

### Достоинства и недостатки моделей

Модель и метод	Достоинства	Недостатки
Регрессионные модели и методы	Простота, гибкость, прозрачность моделирования; единообразие анализа и проектирования	Сложность определения функциональной зависимости; трудоемкость нахождения коэффициентов зависимости; отсутствие возможности моделирования нелинейных процессов (для нелинейной регрессии)
Авторегрессионные модели и методы	Простота, прозрачность моделирования; единообразие анализа и проектирования; множество примеров применения	Трудоемкость и ресурсоемкость идентификации моделей; невозможность моделирования нелинейностей; низкая адаптивность
Модели и методы экспоненциального сглаживания	Простота моделирования; единообразие анализа и проектирования	Недостаточная гибкость; узкая применимость моделей
Нейросетевые модели и методы	Нелинейность моделей; масштабируемость, высокая адаптивность; единообразие анализа и проектирования; множество примеров применения	Отсутствие прозрачности; сложность выбора архитектуры; жесткие требования к обучающей выборке; сложность выбора алгоритма обучения; ресурсоемкость процесса обучения
Модели и методы на базе цепей Маркова	Простота моделирования; единообразие анализа и проектирования	Невозможность моделирования процессов с длинной памятью
Модели и методы на базе классификационно-регрессионных деревьев	Масштабируемость; быстрота и простота процесса обучения; возможность учитывать категориальные переменные	Неоднозначность алгоритма построения дерева; сложность вопроса останова

## ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования средств оказания негативных воздействий обычно применяются подходы, использующие математический аппарат теории графов, теории сетей Петри, теории надежности, теории автоматов и теории марковских процессов. Рассмотрим подробнее каждый из этих подходов.

**Использование математического аппарата теории графов.** В моделях, предложенных в [13, 14] воздействия моделируются с позиции атакующего, при этом акцентируется внимание, что атакующий обладает неполными знаниями о целевой системе и действует в условиях неопределенности. Описывая действия атакующего с учетом его цели, задается граф, моделирующий действия и ресурсы. Корнем графа является цель воздействия. Графы атак представляют собой средство для моделирования и анализа многоэтапных сценариев воздействия в сети. Графы атак позволяют также задавать все условия, необходимые для проведения воздействий, а также взаимосвязи между узлами сети.

Основным ограничением данных моделей является то, что большинство алгоритмов построения графа атак реализовано для небольших сетей размером 15–20 узлов. Масштабирование ведет к экспоненциальному росту количества узлов, связей и сценариев атак. Другим серьезным ограничением является зависимость моделей на основе графов от априорной информации о характеристиках системы. Системы, описываемые графами, наибольшее применение получили для оценивания защищенности сети и анализа рисков [15].

В силу указанных причин моделирование воздействия с точки зрения атакующего с помощью моделей на основе графов в чистом виде является проблематичным.

**Использование математического аппарата сетей Петри.** Основным преимуществом моделей воздействия на основе сетей Петри является то, что они позволяют учитывать как состояния самого процесса, так и действия, которые переводят процесс воздействия из одного состояния в другое. Множество мест представляет состояние процесса, а множество переходов представляет действия или команды, реализуемые атакующим. Другими словами, места – это пассивные компоненты модели, а переходы – активные. Расстановка фишек позволяет моделировать не только последовательность этапов воздействия, но и их динамику. Кроме того, использование цветов для фишек позволяет описывать этот процесс с большей детализацией [16].

В качестве преимуществ сетей Петри можно отметить то, что они позволяют:

- моделировать различные виды воздействий с разной степенью детализации;
- проследить последовательность этапов воздействий и частично отразить их динамику;
- моделировать как отдельного агента, так и совместную работу множества агентов.

Несмотря на качественные преимущества по сравнению с классическими моделями на основе графов, сети Петри имеют ряд недостатков, к ним относятся:

- 1) ориентация на явное задание времени как параметра, что не всегда возможно, из-за наличия неопределенностей при оказании воздействий;
- 2) отсутствие возможности учета неопределенностей, обусловленных неполнотой информации о целевой системе и использованием средств защиты информации.

**Использование математического аппарата теории надежности.** Модели воздействия с использованием математического аппарата теории надежности рассматривают атакующие (негативные) воздействия и защиту от них, как конфликт двух систем, каждая из которых стремится вывести другую из строя. При этом каждая сторона защищается за счёт собственных ресурсов – средств защиты (как правило – избыточности) от воздействия противоположной стороны, стремящейся своими средствами нападения увеличить вероятность перехода системы в неработоспособное состояние. Достигается это через отказы аппаратных компонентов, отказы каналов связи системы управления и системы безопасности.

Важными параметрами моделей негативных воздействий с использованием математического аппарата теории надежности являются функции интенсивностей отказов. С их помощью можно описывать состояние системы на различных этапах информационного конфликта, например, для этапа сбора информации и этапа активного воздействия должны использоваться различные функции интенсивностей отказов.

Преимуществом использования теории надежности для моделирования негативного воздействия является возможность получения зависимости между продолжительностью воздействия и количеством сил и средств, участвующих в конфликте, а также предоставление возможности оценить состояние атакующей или атакуемой системы в процессе негативного воздействия. В качестве недостатка отметим, что данный подход не позволяет рассматривать результативность отдельных этапов.

**Использование математического аппарата теории автоматов.** С помощью моделей на основе теории автоматов удобно описывать системы с внутренними состояниями, которые изменяются под воздействием внешних факторов. В информационной безопасности автоматные модели применяются для описания систем, на которые оказываются дестабилизирующие воздействия, рассматриваемые в качестве входного алфавита в терминологии теории

автоматов. В зависимости от текущего состояния, данные воздействия переводят целевую систему в следующее состояние. Цель атакующего найти последовательность атак, переводящую систему в состояние необходимое атакующему.

Автоматные модели имеют следующие ограничения: атакующий имеет определенный набор атак, каждая из которых представляет собой завершённое действие на систему, результаты которых могут быть оценены атакующим. Однако атакующий не имеет возможности контролировать внутреннее состояние системы, а может только влиять на нее и наблюдать реакцию через каналы коммуникаций. Предполагается, что реакция системы зависит от ее внутреннего состояния и оказанного воздействия. Кроме того, система считается конечной и детерминированной, т. е. для заданных входных данных она может перейти только в одно определенное состояние.

В общем случае теория автоматов предоставляет богатый набор инструментов для исследования моделируемых систем, в частности, широко применяются методы декомпозиции автоматов на несколько подсистем, что позволяет увеличить уровень детализации исследования, а в терминах моделирования информационных систем, например, может позволить изучать отдельно функциональную систему и систему защиты. Теория автоматов имеет следующие ограничения, которые затрудняют ее практическое применение:

- 1) вычисление функций переходов автомата часто бывает сложным и трудоемким;
- 2) в общем случае невозможно получить аналитическое представление функций выходов автомата;
- 3) доступная информация о системе часто оказывается неполной, что ограничивает возможности применения теории автоматов.

**Использование математического аппарата марковских процессов.** Представленное описание цепей Маркова позиционирует их как инструмент для формирования прогнозных моделей. Это подтверждает тезис, что марковские случайные процессы предоставляют простой, но в тоже время эффективный инструмент для исследования различных систем, особенностью которых является вероятностный характер смены состояний.

Марковские случайные процессы активно применяют для проведения исследований в области информационной безопасности. Более того, существуют подходы, в которых используется одновременно математический аппарат теории надежности и теории марковских процессов.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕГАТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Проведем сравнительный анализ подходов к моделированию негативных воздействий с учетом совместимости рассмотренных подходов с прогнозным моделированием.

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа подходов, использующих различный математический аппарат для моделирования негативных воздействий, на предмет соответствия основным характеристикам модели.

Наибольшими преимуществами обладают модели на основе теории надежности и теории марковских процессов перед моделями на основе теории графов и теории сетей Петри. Модели на основе теории автоматов также могут применяться совместно с прогнозными моделями, но имеют несколько существенных ограничений. На основании обобщенных характеристик был проведен сравнительный анализ моделей, которые могут быть использованы для описания негативных воздействий. В соответствии с его результатами моделью, наиболее полно соответствующей всем характеристикам, является модель на основе теории марковских процессов.

Таблица 2

**Подходы к моделированию негативных воздействий**

Характеристики модели	Математический аппарат моделирования негативных воздействий				
	Теория графов	Сети Петри	Теория надежности	Теория автоматов	Теория марковских процессов
Расчет вероятности успешной реализации негативных воздействий	+	+	+	-	+
Учет ресурсов необходимых для проведения негативных воздействий	-	+	+	-	-
Учет влияния систем противодействия	+	-	+	+	-
Учет статистических данных	-	-	+	-	+
Учет влияния среды	-	+	-	+	-
Учет неопределенностей	-	-	+	-	+
Масштабируемость системы	-	+	+	-	+
Возможность расчета продолжительности негативных воздействий	-	+/-	+	-	+
Возможность учета многовариантности негативных воздействий	+	+	+/-	+	+
Применимость для моделирования атак типа отказ в обслуживании	+/-	+/-	+	+	+
Совместимость с прогнозными моделями	-	-	+	+	+
Моделирование непрерывных воздействий	-	-	+	-	+

Возможность масштабирования необходима атакующей системе для добавления новых типов атак, увеличения сил и средств для оказания воздействий. В то же время для атакуемой системы данная характеристика не обязательна: настроенная система может не менять свою структуру на протяжении всего производственного цикла. Таким образом, при моделировании сложных составных систем и процессов для более детального приближения к моделируемому объекту целесообразно рассмотреть составную модель, состоящую из разных подсистем, каждая из которых может использовать свой математический аппарат.

**ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ОКАЗАНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

На основании результатов проведенного сравнительного анализа можно сделать вывод, что ни один из сложившихся подходов не позволяет в полной мере смоделировать процесс проведения негативного воздействия. В то же время для моделирования отдельных компонент процесса могут быть применены подходы на основе теории надежности. Для описания атакуемых систем часто используются модели на основе теории автоматов. Прогнозные модели и модели негативного воздействия могут быть описаны посредством общего математического аппарата марковских процессов.

Рассмотрим в качестве объекта исследования процесс оказания негативного воздействия на программно-аппаратные элементы критически важных инфраструктур в условиях активного конфликтного взаимодействия.

Опишем процесс оказания негативного воздействия через субъектно-объектное взаимодействие двух систем.

Субъектом выступает атакующая система  $F(\vec{A}, \vec{\lambda}, \vec{n}, \vec{m})$  (рис. б), характеризующаяся марковским процессом с состояниями, определенными вектором  $\vec{A} = (A_0, A_1, \dots, A_{N+1})$ , где состояниям  $A_0, A_1, \dots, A_N$  соответствуют атакующие воздействия  $a_0(t), a_1(t), \dots, a_N(t)$  системы  $F$ , а состоянию  $A_{N+1}$  соответствует завершение негативного воздействия:  $a_{N+1}(t) = 0$ . Вектор  $\vec{\lambda} = (\lambda_0(t), \lambda_1(t), \dots, \lambda_N(t))$  определяющий интенсивности переходов:  $\lambda_i(t)$  из состояния  $A_{i-1}$  в состояние  $A_i$  для  $(1 \leq i \leq N)$  и  $\lambda_0(t)$  из состояния  $A_i$  в состояние  $A_{N+1}$ , для  $(0 \leq i \leq N)$ .

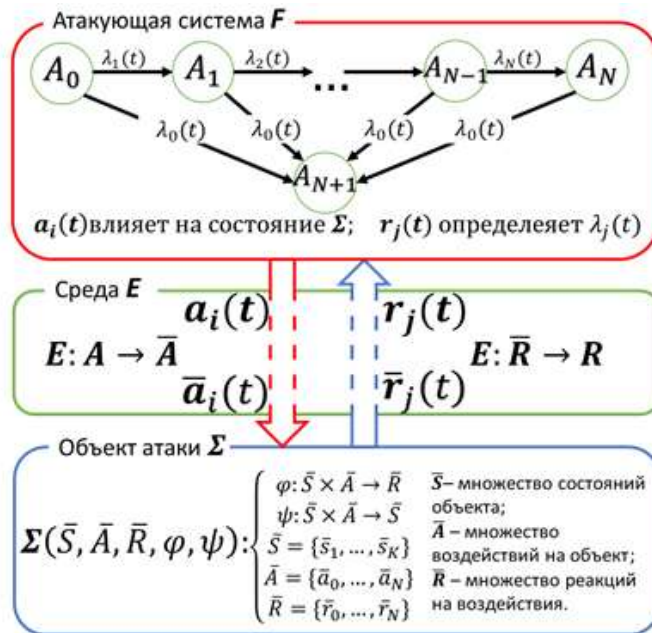


Рис. б. Модель процесса оказания негативного воздействия

Система  $F(\vec{A}, \vec{\lambda}, \vec{n}, \vec{m})$  также характеризуется доступным количеством ресурсов ( $P$ ), которое состоит из  $n$  активных единиц и  $m$  резервных. Для  $n$  задано разбиение  $\vec{n} = (n_0 + n_1 + n_2 + \dots + n_N)$ , где  $n_i$  – количество  $P$ , необходимых для осуществления атаки  $A_i$ .

Параметром системы  $F$  является разбиение  $\vec{m} = (m_0 + m_1 + m_2 + \dots + m_N)$  и соответствующий ему вектор  $\vec{m} = (m_0, m_1, m_2, \dots, m_N)$  резервных  $P$ , разбитых на  $N$  групп. Замена скомпрометированных (в ходе защитных мероприятий) активных  $P$  для осуществления атаки  $a_i(t)$  возможна на резервные  $P$  только из группы  $m_i$ . Учитывая вероятностный характер поведения рассматриваемой системы  $F(\vec{A}, \vec{\lambda}, \vec{n}, \vec{m})$  обозначим через  $\vec{P} = (p_0(t), p_1(t), \dots, p_{N+1}(t))$  вероятность нахождения системы в момент времени  $t$  в состоянии  $A_i$ . При этом, очевидно, что  $\sum_{i=0}^{N+1} p_i(t) = 1$ .

Объектом атаки является защищаемая система  $\Sigma(\bar{S}, \bar{A}, \bar{R}, \varphi, \psi)$ , моделирующая в общем виде критическую инфраструктуру, на которую оказывается негативное воздействие. Система  $\Sigma$  описывается конечным детерминированным автоматом, где

$\bar{S} = \{\bar{s}_1, \dots, \bar{s}_K\}$  – множество внутренних состояний;

$\bar{A} = \{\bar{a}_0(t), \bar{a}_1(t), \dots, \bar{a}_N(t)\}$  – множество внешних воздействий;

$\bar{R} = \{\bar{r}_0(t), \bar{r}_1(t), \dots, \bar{r}_N(t)\}$  – множество реакций системы на воздействия;

$\psi: \bar{S} \times \bar{A} \rightarrow \bar{S}$  – функция перехода состояний, определяющая правила смены состояний под влиянием внешнего воздействия и текущего состояния;

$\varphi: \bar{S} \times \bar{A} \rightarrow \bar{R}$  – функция, формирующая реакцию в зависимости от текущего состояния и оказываемого воздействия.

Система  $F$  осуществляет воздействия  $a_i(t)$  на объект атаки  $\Sigma$ , через среду  $E$ . Среда вносит искажения в атакующие воздействия системы  $F$ , в модели это представлено как отображение  $E: \langle a_0(t), \dots, a_N(t) \rangle \rightarrow \langle \bar{a}_0(t), \dots, \bar{a}_N(t) \rangle$ . Аналогично, среда вносит искажения в реакции системы на воздействия  $E: \langle r_0(t), \dots, r_N(t) \rangle \rightarrow \langle \bar{r}_0(t), \dots, \bar{r}_N(t) \rangle$ .

Согласно представленной модели, воздействие продолжается пока атакующая система находится в одном из состояний  $A_0, A_1, \dots, A_N$ . Также будем считать, что реакция атакуемой системы, негативно влияет на активные  $P$ , выводя их из строя, тем самым активизируя резервы. Функция интенсивностей переходов  $\lambda_i(t)$  коррелирует с количеством резервных  $P$ , в том смысле, что чем меньше осталось резервов, тем вероятнее должен быть переход в следующее состояние, в противном случае может оказаться, что количество активных  $P$  меньше необходимого минимума для осуществления атаки и негативное воздействие прервется, что противоречит требованиям его непрерывности. Таким образом, резервные ресурсы влияют на продолжительность атаки и позволяют оценивать ее длительность по известной реакции атакуемой системы  $\Sigma: \bar{R} = \{\bar{r}_0(t), \bar{r}_1(t), \dots, \bar{r}_N(t)\}$ .

Предложенную модель можно исследовать как математическим аппаратом марковских процессов, составляя уравнения Колмогорова, для нахождения предельного (стационарного) распределения  $\vec{P} = \langle p_0(t), p_1(t), \dots, p_{N+1}(t) \rangle$ , так и подходами из теории надежности, рассматривая вывод из строя ресурсов нарушителя как отказ с интенсивностью  $\lambda_i(t)$  и с  $m_i$  резервных элементов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены прогнозные модели, применяемые для построения прогнозов в различных областях науки и практической деятельности. Также проанализированы подходы по моделированию негативных воздействий с целью выбрать наиболее подходящую модель для изучения возможности прогнозирования процессов в ходе такого рода деструктивного поведения одной из взаимодействующих систем. Основой разрабатываемой модели является субъектно-объектный подход, где в качестве субъекта выступает атакующая система, а в качестве объекта – система, на которую оказывается негативное воздействие.

При разработке прогнозной модели процесса оказания негативных воздействий на объекты критически важных инфраструктур принимались во внимание требования, предъявляемые к прогнозным моделям, требования, предъявляемые к проведению негативных воздействий, результаты проведенного сравнения моделей и методов прогнозирования и проведенный анализ подходов к моделированию средств оказания негативного воздействия и средств защиты.

На основании результатов проведенного анализа сделан вывод, что предложенная модель учитывает основные параметры конфликтного взаимодействия (ресурсы атакующего, его действия и цели, средства защиты, средства противодействия) и позволяет получить оценки продолжительности проведения негативного воздействия посредством применения общего математического аппарата марковских случайных процессов.

**Список используемых источников**

1. *Саркисян С. А.* Теория прогнозирования и принятия решений. – М. : Высш. шк., 1977. – 351 с.
2. *Алиев Т. И.* Основы моделирования дискретных систем : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
3. *Тихонов Э. Е.* Прогнозирование в условиях рынка. – Невинномысск, 2006. – 221 с.
4. *Леоненков А. А.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
5. *Armstrong J. S.* Forecasting for Marketing // Quantitative Methods in Marketing. – London : International Thompson Business Press, 1999. – P. 92–119.
6. *Jingfei Yang M. Sc.* Power System Short-term Load Forecasting: Thesis for Ph.d degree. – Germany, Darmstadt : Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitet, 2006. – 139 p.
7. *Draper N., Smith H.* Applied regression analysis. – New York : Wiley, In press, 1981. – 693 p.
8. *Бокс Дж., Дженкинс Г. М.* Анализ временных рядов, прогноз и управление. – М. : Мир, 1974. – 406 с.
9. *Mazengia D. H.* Forecasting Spot Electricity Market Prices Using Time Series Models: Thesis for the degree of Master of Science in Electric Power Engineering. – Gothenburg : Chalmers University of Technology, 2008. – 89 p.
10. Эконометрия : учеб. пособие / В. И. Суслов [и др.]. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – 744 с.
11. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
12. *Zhu J., Hong J., Hughes J.G.* Using Markov Chains for Link Prediction in Adaptive Web Sites // 1st International Conference on Computing in an Imperfect World. – UK, London, 2002. – P. 60–73.
13. *Arce I., McGraw G.* State of the art security from an attacker`s viewpoint // PacSec Conference. – Tokyo, 2003. – P. 113–123.
14. *Richarte G.* Modern Intrusion Practices // Black Hat Briefings. – Las Vegas, 2003.
15. *Котенко И. В., Степашкин М. В.* Оценка защищенности компьютерных сетей на основе анализа графов атак // Проблемы безопасности и противодействия терроризму : материалы Второй междунар. науч. конф. по проблемам безопасности и противодействию терроризму. – М. : МЦНМО, 2007. – С. 466–481.
16. *Dahl O. M.* Using coloured petri nets in penetration testing // PhD thesis, Department of Computer Science and Media Technology. – Norway, Gjøvik : Gjøvik University College, 2005. – 100 p.

Е. А. Бабушкин<sup>1</sup>;

Р. С. Володин<sup>2</sup>,

кандидат технических наук;

Р. В. Калашников<sup>3</sup>,

кандидат технических наук;

А. М. Лаврентьев<sup>4</sup>,

доктор технических наук, профессор

<sup>1, 3, 4</sup> Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, г. Ярославль.

<sup>2</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕЛЕНГОВАНИЯ ПОСТАНОВЩИКОВ АКТИВНЫХ ПОМЕХ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ ПРОХОДНОГО ТИПА

В работе представлена модель процесса пеленгования постановщиков активных помех, действующих с близких угловых направлений, в многофункциональных радиолокационных станциях с фазированной антенной решеткой проходного типа и дополнительными облучателями с цифровым выходом при выполнении алгоритмов спектрального оценивания угловых координат.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка проходного типа; пеленгация постановщиков активных помех; угловое сверхразрешение; пространственный спектр.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из приемов радиоэлектронного подавления радиоэлектронных средств, в том числе многофункциональных радиолокационных станций (МРЛС) двойного назначения является формирование маскирующих помех специализированными самолетами – постановщиками активных помех (ПАП). Действуя по 2-3 ПАП из зон дежурства в воздухе, находящихся вне досягаемости огневых средств, они осуществляют подавление каналов обнаружения МРЛС шумовыми помехами [1]. Для борьбы с такими помехами МРЛС традиционно оснащаются подсистемой автоматической компенсации помех (АКП), которая позволяет вычитать из аддитивной смеси полезного сигнала и помехи в основном канале (ОК) ее коррелированную помеховую составляющую, полученную дополнительным компенсационным каналом (КК) [2]. Подсистема АКП позволяет снизить мощность помехи в ОК практически до уровня собственного шума, если число источников помех не превышает число каналов АКП [3].

В прогнозируемой обстановке (рис. 1), заключающейся в воздействии ПАП из множества зон барражирования, может возникнуть ситуация, при которой требование не превышения числа ПАП над числом КК подсистемы АКП не будет выполнено. Воздействие большого количества помех может привести к снижению дальности обнаружения ниже заданной.

В работе [4] предлагается для повышения дальности АКП вместо внедрения дополнительных компенсационных антенн со своими системами облучателей и фазированными антенными решетками (ФАР), использовать только часть элементов основного полотна ФАР и систему дополнительных облу-

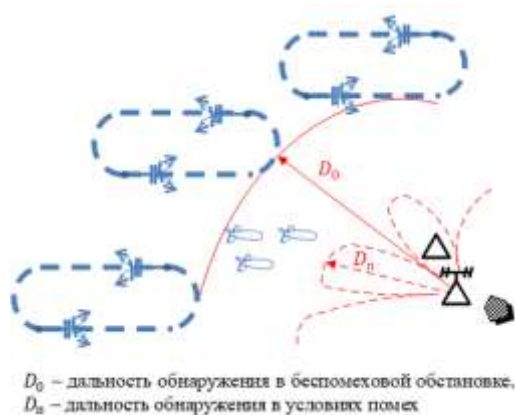


Рис. 1. Прогнозируемая обстановка



чателей с цифровым выходом, расположенных рядом с основным (рис. 2). Основным недостатком данного решения является то, что его реализация требует точной информации о пеленгах на ПАП (ошибка не должна превышать  $1^\circ$ ) [4, 5]. Обусловлено это необходимостью установки узких лучей КК в направлении на ПАП.

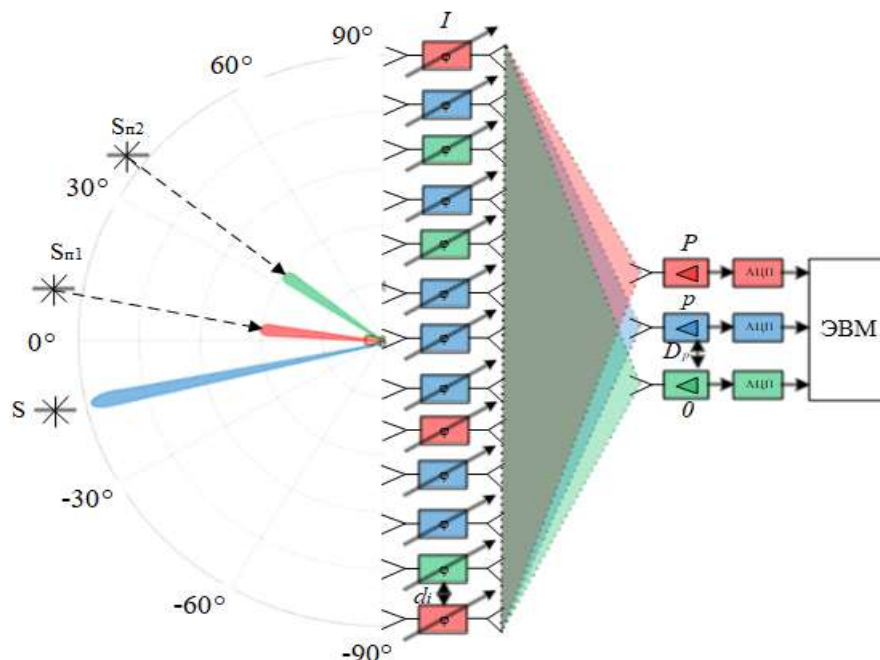


Рис. 2. ФАР проходного типа с облучателями, формирующими дополнительные КК

Задача пеленгования осложняется тем, что большое удаление до ПАП приводит к их близкому угловому расположению относительно МРЛС, что накладывает высокие требования к разрешающей способности пеленгатора. В то же время использование системы облучателей с цифровым выходом позволяет использовать методы спектрального анализа для пеленгования со сверхразрешением, такие как MUSIC, Кейпона, теплового шума и др., обладающих высокой точностью при отсутствии декорреляции сигналов и амплитудно-фазовых ошибок в каналах обработки [6].

Отсутствие моделей процесса пеленгования ПАП со сверхразрешением в МРЛС с ФАР проходного типа, учитывающих вносимые ФАР искажения, обуславливает актуальность. Это формирует цель работы, заключающуюся в разработке модели процесса пеленгования ПАП, действующих с близких угловых направлений, в МРЛС с ФАР проходного типа и дополнительными облучателями с цифровым выходом при выполнении алгоритмов спектрального оценивания угловых координат.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать модель процесса пеленгования ПАП в МРЛС с ФАР проходного типа и дополнительными облучателями с цифровыми выходами при применении спектральных алгоритмов оценивания угловых координат, учитывающую новые факторы. Обосновать методы и алгоритмы ее функционирования, а также получить зависимости для выбора оптимальных значений внутренних параметров системы в интересах повышения точности пеленгования ПАП.

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕЛЕНГОВАНИЯ ПОСТАНОВЩИКОВ АКТИВНЫХ ПОМЕХ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ

Процесс пеленгования ПАП методами спектрального анализа подразумевает получение оценок максимального правдоподобия числа и угловых координат источников излучений по отклику системы облучателей на помеховые колебания:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmax}_{\theta \in \Theta} [f(\theta)], \quad (1)$$

где  $\hat{\theta}$  – оценка пеленга ПАП;  
 $\theta$  – азимутальный угол;  
 $\Theta$  – интервал значений азимута, в котором пеленгуется ПАП;  
 $f(\theta)$  – функция, характеризующая отклик системы облучателей на амплитудно-фазовое распределение, формируемое ПАП на облучателях.

Для этого требуется многоканальный прием сигналов с их последующей обработкой. Поскольку пеленгование ПАП подразумевает выполнение операций пространственно-временной обработки, осуществляемых в реальных МРЛС отдельно, то и модель системы можно разделить на две основные части: антенно-фидерную подсистему и подсистему обработки сигналов. Источником входных воздействий выступают  $M$  моделей ПАП, а результирующие пеленги подвергаются статистической обработке. Функциональная схема системы может быть представлена в виде блок-схемы основных элементов (рис. 3).

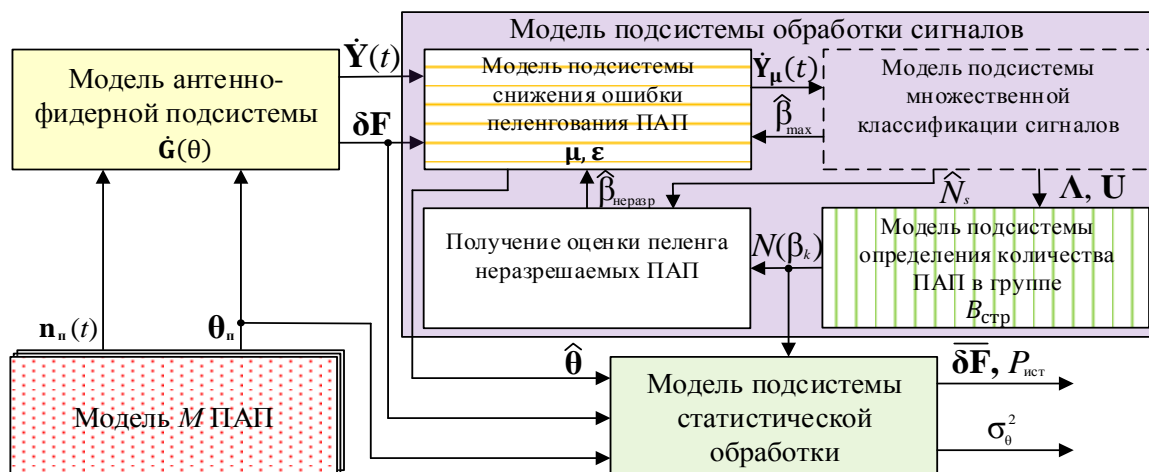


Рис. 3. Функциональная схема модели процесса пеленгования ПАП в МРЛС с ФАР проходного типа

На рисунке приняты следующие обозначения:

$n_n(t)$  – матрица реализаций помех,  $n_n(t) = [n_{n0}(t), \dots, n_{nm}(t), \dots, n_{nM}(t)]^T$ ;

$\theta_n$  – матрица-вектор азимутов ПАП,  $\theta_n = [\theta_{n0}, \dots, \theta_{nm}, \dots, \theta_{nM}]$ ;

$\dot{Y}(t)$  – матрица реализаций сигналов в каналах,  $\dot{Y}(t) = [\dot{Y}_0(t), \dots, \dot{Y}_p(t), \dots, \dot{Y}_P(t)]^T$ ;

$\hat{\theta}$  – матрица-вектор оценок азимутальных пеленгов ПАП,  $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_0, \dots, \hat{\theta}_m, \dots, \hat{\theta}_M]$ ;

$p$  – номер облучателя;

$P$  – количество облучателей;

$m$  – номер ПАП;

$M$  – количество ПАП.

В качестве модели помехи принимается стационарный случайный процесс типа «белый шум» со спектральной плотностью мощности, рассчитываемой исходя из характеристик станций постановки помех:

$$\sigma_{pm}^2 = \frac{P_{pm} \cdot G_{pm} \cdot A_{кэфф}}{4\pi \cdot \Delta f_{pm} \cdot r_{pm}^2}, \quad (2)$$

где  $P_{pm}$  – мощность передатчика помех;  
 $G_{pm}$  – коэффициент усиления передающей антенны станции помех;  
 $\Delta f_{pm}$  – ширина спектра помехи;  
 $A_{кэфф}$  – эффективная площадь раскрыва антенны приемного канала;  
 $r_{pm}$  – дальность до ПАП.

Пространственная обработка сигналов осуществляется антенно-фидерной подсистемой, которая должна обеспечивать линейную операцию суммирования сигналов от всех элементов ФАР с весами, задаваемыми АФР. В результате операции суммирования по пространству ансамбля сигналов получается  $P$  реализаций, амплитуда и фаза которых зависит от разности между направлением фронта падающей волны и нормалью к раскрыву [7]. Результирующие реализации для  $M$  ПАП описываются выражением

$$\dot{Y}(t) = \sum_{m=1}^M \left[ \sqrt{\dot{G}_k(\theta_{pm})} \cdot n_p(t) \right] + n_0(t), \quad (3)$$

где  $\dot{G}_k(\theta_{pm})$  – вектор-столбец коэффициентов усиления каналов в направлении  $m$ -го ПАП,  $\dot{G}_k(\theta_{pm}) = [\dot{G}_{k1}(\theta_{pm}), \dots, \dot{G}_{kp}(\theta_{pm}), \dots, \dot{G}_{kP}(\theta_{pm})]^T$ ;  
 $\theta_{pm}$  – азимут  $m$ -го ПАП;  
 $n_p(t)$  – матрица реализаций помех,  $n_p(t) = [n_{p0}(t), \dots, n_{pm}(t), \dots, n_{pM}(t)]^T$ ;  
 $n_0(t)$  – матрица реализаций собственного шума в каналах с равной спектральной плотностью мощности  $\sigma_0^2$ ,  $n_0(t) = [n_{01}(t), \dots, n_{0p}(t), \dots, n_{0P}(t)]^T$ .

Сведения о различии в углах прихода помех содержатся в значениях характеристик направленности приемных каналов, которые для ФАР рассчитываются через произведение диаграммы направленности элемента и множителя решетки:

$$\dot{G}_{kp}(\theta) = G_{\max} \left( \frac{F_{эл}(\theta) \cdot \dot{F}_p(\theta)}{\sum_{i=1}^I A_{0i}} \right)^2, \quad (4)$$

где  $G_{\max}$  – значение максимального коэффициента усиления антенны;  
 $F_{эл}(\theta)$  – значение нормированной диаграммы направленности элемента ФАР;  
 $A_{0i}$  – элемент матрицы  $A_0$ ;  
 $A_0$  – вектор-столбец, характеризующий амплитудное распределение, формируемое  $0$ -м облучателем на элементах ФАР,  $A_0 [A_{01}, \dots, A_{0i}, \dots, A_{0I}]^T$ ;  
 $i$  – номер элемента ФАР;  
 $I$  – количество элементов ФАР;  
 $\dot{F}_p(\theta)$  – ненормированный множитель антенной решетки.

В МРЛС в качестве антенных элементов ФАР используются стержневые диэлектрические антенны [2], диаграмма направленности которых описывается выражением

$$F_{эл}(\theta) = \cos\theta \frac{J_1\left(\frac{\kappa \cdot h}{2} \sin\theta\right) \sin\left(\frac{\kappa \cdot L}{2} \left[\frac{1}{\xi} - \cos\theta\right]\right)}{\frac{\kappa \cdot h}{2} \sin\theta \frac{\kappa \cdot L}{2} \left[\frac{1}{\xi} - \cos\theta\right]}, \quad (5)$$

где  $\kappa$  – волновое число;  
 $h$  – диаметр стержня;  
 $L$  – длина стержня;  
 $\xi$  – коэффициент замедления диэлектрика.

Множитель решетки представляет собой прямое преобразование Фурье от АФР на ФАР для каждого канала:

$$\dot{F}_p(\theta) = \sum_{i=1}^I \dot{\Phi}_p \cdot \exp[j \cdot \kappa \cdot d \cdot \sin(\theta)], \quad (6)$$

где  $d$  – вектор-столбец, характеризующий положение элементов ФАР,  $d[d_1, \dots, d_i, \dots, d_I]^T$ ;  
 $\dot{\phi}_p$  – вектор-столбец, характеризующий амплитудное  $A_p$  и фазовое  $\vartheta_p$  распределения, формируемые  $p$ -м облучателем на ФАР, а также фазовое распределение  $\varphi$ , задаваемое на элементах антенной решетки фазовращателями,  $\dot{\phi}_p = A_p e^{j(\varphi + \vartheta_p)}$ .

Формируемые облучателями распределения электромагнитного поля на ФАР подбираются таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное усиление и наименьший уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны (ДНА) [2]. С этой целью применяют спадающее к краям амплитудное распределение, модель которого описывается выражением

$$A_p = 0.8 \cdot \cos \left[ \frac{\pi \cdot (d - D_p)}{2} \right], \quad (7)$$

где  $D_p$  – координата  $p$ -го облучателя.

Наличие в МРЛС в качестве антенной системы ФАР проходного типа позволяет формировать ДНА любой конфигурации и осуществлять безынерционное сканирование пространства [2]. Такая возможность появляется благодаря возможности применения на элементах ФАР любого фазового распределения. В ФАР используются, в основном, линейное фазовое распределение для отклонения главного луча ДНА и квадратичное распределение для компенсации сферичного фазового фронта, формируемого облучателем, с целью получения узкого луча ДНА. Его математическую модель можно записать следующим образом:

$$\varphi = v \cdot \vartheta_0 + \kappa \cdot d \cdot \sin(\theta_{\text{скан}}), \quad (8)$$

где  $\vartheta_0$  – значение квадратичного фазового распределения на ФАР, компенсирующего сферичный фазовый фронт волны;  
 $v$  – коэффициент «масштабирования» ДНА.

Значение набега фазы, формируемого каждым облучателем на элементах ФАР, описывается исходя из приближений геометрической оптики:

$$\vartheta_p = \kappa \cdot \left[ \sqrt{(d + D_p)^2 + z_0^2} - z_0 \right]. \quad (9)$$

Таким образом, модель помех, формируемых ПАП на выходе антенно-фидерной подсистемы, можно описать функционалом  $\dot{Y}_p(t) = f[n_p(t), \theta_p, \dot{G}_p(\theta)]$  и представить в виде блок-схемы (рис. 4).

При наличии одного ПАП возможно определять разность между реализуемым АФР на системе облучателей и ожидаемым АФР, формируемым плоским фронтом волны. Этой разностью будет величина амплитудно-фазовых ошибок, вносимых ФАР:

$$\delta F(\theta) = \arg[\dot{Y}(0)] - \kappa \cdot D \cdot \sin(\theta). \quad (10)$$

Наличие информации о значениях фазовых ошибок и возможность адаптивной подстройки весовых коэффициентов системы облучателей позволяют корректировать эти ошибки в пространственных каналах. Для этого модель подсистемы обработки сигналов содержит подсистему снижения ошибок, которая на основании значений ошибок подбирает минимизирующие их фазовые поправки. В результате чего скорректированные реализации в каналах приобретают вид

$$\dot{Y}_\mu(t) = \dot{Y}(t) \cdot e^{j\mu}, \quad (11)$$

где  $\mu$  – вектор фазовых поправок на системе облучателей,  $\mu = f(\delta F)$ .

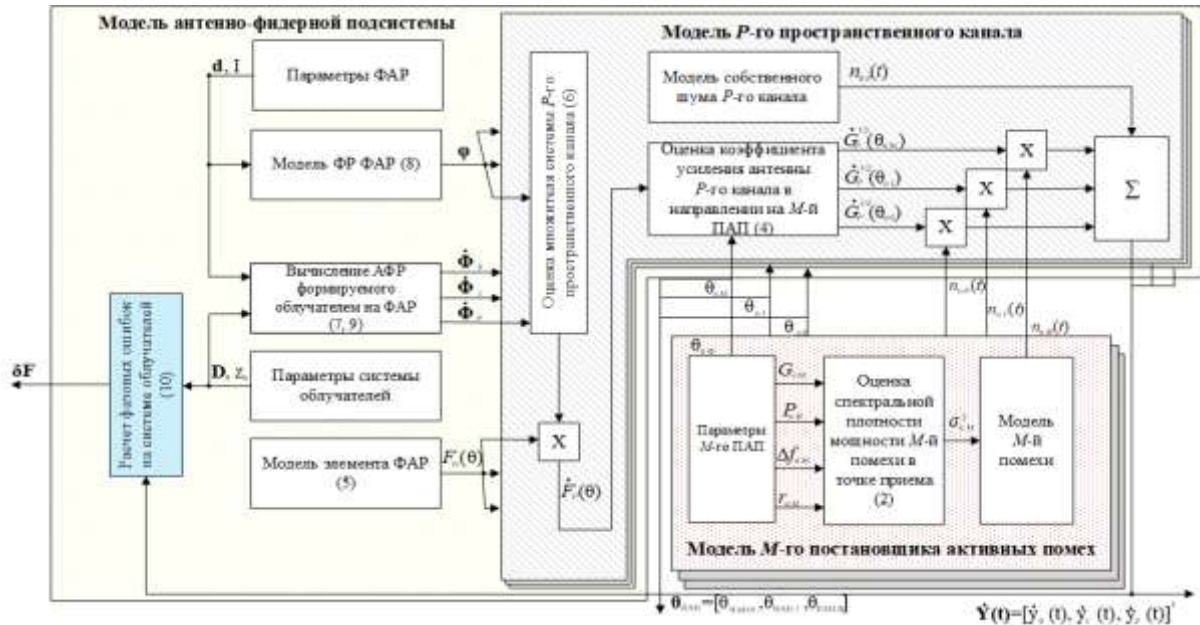


Рис. 4. Блок-схема моделей антенно-фидерной подсистемы и ПАП

Процесс пеленгования ПАП методами спектрального анализа подразумевает получение оценок максимального правдоподобия числа и угловых координат источников излучений по отклику пространственного фильтра, реализуемого системой облучателей, на помеховые колебания:

$$\hat{\beta}_{\max} = \operatorname{argmax}\{f[\dot{Y}_{\mu}(t)]\}, \quad (12)$$

где  $\hat{\beta}_{\max}$  – оценка азимутального пеленга ПАП, полученных по положению максимального отклика пространственного фильтра.

В случае, если получаемые таким образом пеленги ПАП имеют систематическую составляющую, которую можно учесть, то в подсистеме снижения ошибки пеленгования осуществляется пересчет положений максимального отклика в пеленг ПАП:

$$\hat{\theta} = \hat{\beta}_{\max} \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

где  $\varepsilon$  – поправочный коэффициент,  $\varepsilon = f(\delta F)$ .

Поскольку ковариационная матрица (КМ) сигналов является исчерпывающей характеристикой входного сигнала, то основные алгоритмы пеленгования со сверхразрешением подразумевают ее использование в своей работе:

$$R = \frac{1}{2L} \dot{Y}_{\mu}^H \dot{Y}_{\mu}, \quad (14)$$

где  $L$  – количество отсчетов реализации.

В частности, один из наиболее распространенных спектральных методов пеленгования со сверхразрешением MUSIC подразумевает выполнение спектрального разложения КМ [6]:

$$R = U^H \Lambda U, \quad (15)$$

где  $U$  – матрица, столбцами которой являются собственные вектора (СВ) КМ;

$\Lambda$  – диагональная матрица, элементами которой являются собственные числа (СЧ),  $\Lambda = \operatorname{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_p, \dots, \lambda_P)$ .

Физически СВ представляют собой ФР, при воздействии которого на входную реализацию произойдет взаимная декорреляция помеховых сигналов в каналах обработки. Собственные числа (СЧ) в таком случае являются мощностями результирующих реализаций в

каналах, а количество СЧ, превышающих по мощности уровень собственного шума, характеризует количество действующих ПАП и размерность сигнального подпространства:

$$\hat{N}_S = \text{количество}(\lambda_p \geq \sigma_0^2). \quad (16)$$

Под сигнальным понимается подпространство, сформированное сигнальными СВ, чьи СЧ превысили шумовой порог. Так как СВ обладают свойством взаимной ортогональности, т. е.  $U^H U = U U^H = E$  (где  $E$  – единичная матрица), то проекция сигнального подпространства на единичную матрицу оказывается подпространством, сформированным оставшимися СВ, называемым шумовым:

$$P_0 = E - \sum_{p=1}^{\hat{N}_S} U_p U_p^H, \quad (17)$$

где  $U_p$  – СВ расположенные в порядке убывания, соответствующих им СЧ  $\lambda_p$ .

На основании ортогональности шумового и сигнального подпространств и основан спектральный метод MUSIC [6]:

$$Q_{MUSIC}(\beta) = [V(\beta)^H P_0 V(\beta)]^{-1}, \quad (18)$$

где  $P_0$  – матрица-проектор на шумовое подпространство ковариационной матрицы;  
 $V(\beta)$  – вектор-гипотеза,  $V(\beta) = \exp[-j \cdot \kappa \cdot D \cdot \sin(\beta)]$ .

Суть метода заключается в том, что изменение угла ожидаемого прихода волны  $\beta$  в векторе-гипотезе эквивалентно сканированию вектором в  $P$ -мерном пространстве признаков. В тех случаях, когда сканирующий вектор попадает в сигнальное подпространство, т. е. соответствует направлению прихода излучения ПАП, он оказывается ортогональным шумовому подпространству и эрмитова форма  $V(\beta)^H P_0 V(\beta)$  равна нулю, что соответствует максимуму отклика фильтра, работающему по алгоритму (18). В результате этого формируется пик пространственного спектра, по положению которого можно судить о пеленге ПАП.

Поскольку амплитудно-фазовые ошибки несколько «подсаживают» и расширяют пик максимального отклика фильтра в силу отличия сканирующего вектора-гипотезы от сигнального вектора помехи, то два близко расположенных максимума могут слиться в один и отдельные ПАП не будут разрешаться на пространственном спектре [6]. В то же время на значения СЧ КМ амплитудно-фазовые ошибки влияния не оказывают, что позволяет определять число действующих ПАП, даже если не все из них разрешаются на пространственном спектре.

Для определения количества ПАП в пределах интервала углов каждого максимума отклика пространственного фильтра, при наличии неразрешаемых по пространственному спектру ПАП, в модели предусмотрена подсистема определения количества ПАП в группе.

Работа подсистемы основана на последовательном «подавлении» ПАП (под подавлением ПАП понимается исключение из обработки сигнальных СВ КМ, на которые опираются вектора АФР системы облучателей от «подавляемых» ПАП [8]) и формировании угловых стробов на пространственном спектре с центрами в положении его максимумов и разным количеством подавленных ПАП:

$$Q_{nk}(\beta) = Q_n(\beta) \cdot \varsigma_k, \quad (19)$$

где  $Q_n(\beta)$  – пространственный спектр с  $n$  подавленными ПАП;  
 $\varsigma_k$  – угловой строб в направлении  $k$ -го максимума спектра с переменным размером строба  $B_{стр}$ ,  $\varsigma_k = \text{rect}(\hat{\beta}_{\max k}, B_{стр})$ .

Поскольку подавление ПАП приводит к искажению пространственного спектра в том угловом стробе, в котором он был, и малым изменениям в других местах, то угловой строб, спектр которого подвергся наибольшему искажению, содержит группу ПАП. Количественное изменение стробированных спектров характеризует коэффициент линейной корреляции:

$$\rho_{nk}(Q_{nk}, Q_{n-1k}) = \frac{M(Q_{nk} \cdot Q_{n-1k})}{\sigma_{Q_{nk}} \cdot \sigma_{Q_{n-1k}}}, \quad (20)$$

где  $M(\cdot)$  – операция вычисления ковариации (при  $n=1$   $Q_{n-1k} = Q_k$ );

$\sigma_{Q_{nk}}$  – среднее квадратическое отклонение элементов стробированного спектра.

На основе значений коэффициентов корреляции должны заполняться строки булевой матрицы изменений из условия, что стробированному спектру с наименьшим коэффициентом корреляции соответствует 1, а остальным 0:

$$Ch_{nk} = \begin{cases} 1 & \rightarrow \min \rho_{nk} \\ 0 & \end{cases}. \quad (21)$$

Тогда сумма столбцов матрицы, увеличенная на единицу, будет соответствовать количеству ПАП в каждой группе:

$$N(\beta_k) = \sum Ch_k + 1, \quad (22)$$

где  $N(\beta_k)$  – количество ПАП в  $k$ -м угловом стробе.

Поскольку интервал наблюдения напрямую влияет на коэффициент корреляции наблюдаемых величин, то учет влияния размеров углового строба  $B_{стр}$  на коэффициент корреляции стробированных спектров позволяет повысить вероятность определения истинного количества ПАП в группе.

Так как модель должна иметь в качестве выходных данных значения пеленгов, то ПАП, неразрешаемым по пространственному спектру, должна присваиваться интервальная оценка с интервалом, равным ширине пика пространственного спектра. Отдельным ПАП будет соответствовать точечная оценка пеленга:

$$\beta_{неразр} = \begin{cases} \beta_{\max k} + \Delta\beta_{-3дБk} \rightarrow N(\beta_k) > 1 \\ \beta_{\max k} \rightarrow N(\beta_k) = 1 \end{cases} \quad (23)$$

с учетом устранения систематической ошибки в соответствии с (13).

Таким образом, существующую в реальных радиолокационных станциях обработку во временной области реализует модель подсистемы обработки сигналов, которая описывается функционалом  $\hat{\theta} = f[\dot{Y}_p(t), \delta F, \mu, B_{стр}]$ .

Необходимость варьирования внутренними управляемыми параметрами системы, а также наличие элементов со стохастическим характером предопределяют наличие статистической обработки результатов. В ее рамках необходимо накопление множества результатов измерений пеленгов, фазовых ошибок на системе облучателей и разности измеренного и истинного количества ПАП в угловых стробах при различных значениях параметров системы. Накопленные результаты в последующем подвергаются усреднению.

Блок-схему подсистем обработки сигналов и статистической обработки можно представить в виде совокупности связанных элементов (рис. 5).

Разработанная модель при варьировании параметрами позволяет получать зависимость величины фазовых ошибок в системе облучателей от ФР на элементах ФАР и углового положения ПАП (рис. 6), а также зависимость вероятности определения истинного количества ПАП в группе от углового положения ПАП и размеров углового строба (рис. 7).

Зависимости получены путем усреднения многократно повторенных опытов для десяти-элементной системы облучателей, размещенных в виде кольца с радиусом 4,5 длины волны и пеленгации ПАП, которые формируют сигнал типа «белый шум» с интенсивностью, обеспечивающей отношение помеха-шум в канале, равное 30 дБ.

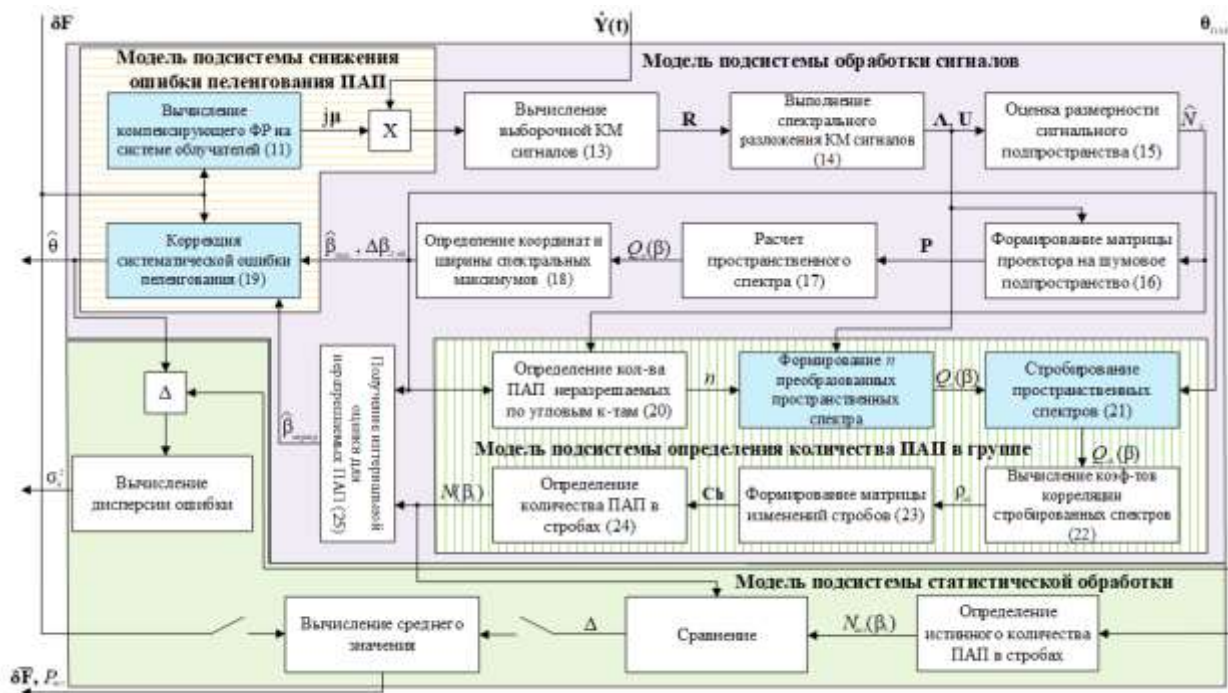


Рис. 5. Блок-схема моделей подсистем обработки сигналов и статистической обработки

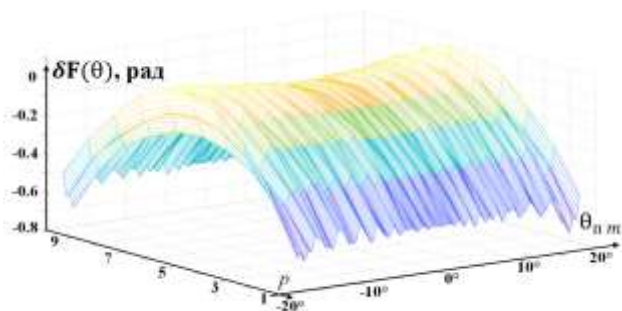


Рис. 6. Зависимость фазовых ошибок в системе облучателей при нулевом ФР на элементах ФАР

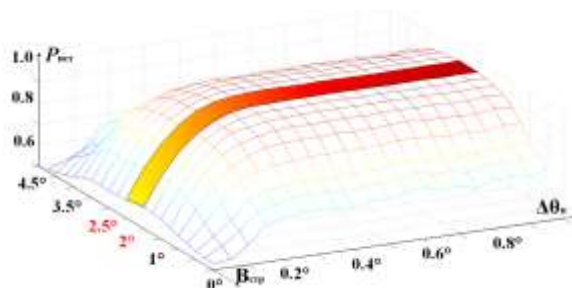


Рис. 7. Зависимость вероятности определения истинного количества ПАП в группе от углового расстояния между ними

Полученная на модели зависимость (рис. 6) позволяет подобрать такие значения вектора фазовых поправок на системе облучателей  $\mu$ , которые позволят снизить влияние вносимых ФАР искажений и повысить точность пеленгования. Полученная на модели зависимость (рис. 7) позволяет подобрать оптимальный размер углового строга  $B_{стр}$ , тем самым обеспечить максимальную вероятность определения истинного количества ПАП в группе вне зависимости от их взаимного углового рассогласования для получения интервальной оценки пеленга неразрешаемых по угловым координатам ПАП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель системы пеленгования ПАП, действующих с близких угловых направлений в МРЛС с ФАР проходного типа и дополнительными облучателями с цифровым выходом, в отличие от известных учитывает влияние углового положения ПАП на величину фазовых искажений фронта волны в сечении облучателей, а также размеров угло-



вого строга на величину коэффициентов корреляции стробированных пространственных спектров.

Впервые получены зависимости величины и характера фазовых ошибок в каналах обработки от углового положения ПАП, а также вероятности определения истинного количества ПАП в группе от размеров стробов и углового рассогласования между ПАП. Исходя из этого, цель работы можно считать достигнутой.

### Список используемых источников

1. Силы и средства воздушно-космического нападения потенциального противника и основы их боевого применения : учеб. пособие / Ю. В. Ворущенко [и др.]. – Ярославль : ЯФ ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – 188 с.

2. Многофункциональная радиолокационная станция 92Н6Е. Антенный пост и аппаратный контейнер : учеб. пособие / И. А. Чепурнов [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 146 с.

3. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / И. Ю. Лосев [и др.]; под ред. И. Ю. Лосева. – М. : Радио и связь, 1988. – 208 с.

4. *Калашиков Р. В., Лаврентьев А. М.* Методика выделения из круглой ФАР просветно-линзового типа элементарных излучателей для формирования дополнительных компенсационных антенн // Материалы международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2018». Москва, 11-12 мая 2018 г. – М., 2018. – С. 65–70.

5. *Бабушкин Е. А., Лаврентьев А. М., Калашиков Р. В.* Оценка влияния точности определения пеленга источника помех на эффективность функционирования подсистемы защиты от активных маскирующих помех современных радиолокационных станций // Сборник трудов ХLI ВНТК «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». – Серпухов, 2022. – Ч. 4. – С. 95–99.

6. *Ратынский М. В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М. : Радио и связь, 2003. – 200 с.

7. *Monzingo R. A.* Introduction to Adaptive Arrays. – New York : John Wiley and sons, 1980. – 446 p.

8. *Stone J. V.* Independent component analysis: An introduction // Trends in cognitive sciences. – 2002. – № 6. – P. 59–64.

М. Ш. Валишин;  
Е. А. Новиков,  
*доктор технических наук, доцент;*  
Р. Р. Рахимов

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЗАДАЧЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА СЕТИ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ИНТЕРЕСАХ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ КОЛМОГОРОВА – ЧЕПМЕНА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ**

В статье рассматривается оригинальный подход к решению задачи управления скоростью передачи данных в сети связи и передачи данных (ССПД) наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами в форме обратной связи на основе использования системы дифференциальных уравнений Колмогорова – Чепмена с нестационарными параметрами. На основе разрабатываемой модели процесса управления ССПД сформулирована задача оптимального управления по критерию максимума эффективности использования пропускной способности при ограничениях на качество обслуживания мультисервисного трафика.

Ключевые слова: нестационарная система массового обслуживания, уравнение Колмогорова – Чепмена, наземный комплекс управления, космический аппарат.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время существенно возрастает роль применения космических информационных систем при решении широкого спектра научных и социально-экономических задач. Задача обеспечения штатного функционирования космических аппаратов решается автоматизированной системой управления, которая состоит из бортового и наземного комплексов управления. Функционирование наземных комплексов управления (НКУ) космическими аппаратами (КА), объединенных в наземный автоматизированный комплекс управления (НАКУ) КА, в свою очередь, обеспечивается за счет ресурсов сети связи и передачи данных (ССПД). Сеть связи и передачи данных НАКУ КА ограничена физически возможностями линий связи и логически договорами аренды и характеризуется следующими особенностями:

– при возникновении нештатных ситуаций поток трафика данных в интересах управления КА характеризуется как нестационарный;

– процесс передачи данных в интересах управления КА, как правило, носит плановый стационарный характер, а процесс передачи трафика речи и видеоданных имеет признаки нестационарного процесса;

– применение планового расчетного подхода [1], как правило, сводится к определению потребной пропускной способности каналов связи на основе предположения о том, что поток входящего трафика является «простейшим».

Анализ опыта управления ССПД показывает, что в настоящее время доминирует эмпирический подход к решению задачи распределения ресурсов ССПД. Применение такого подхода к распределению ресурса ССПД приводит либо к неэффективному использованию [1] пропускной способности каналов связи, либо к снижению качества обслуживания [2] передаваемого трафика. При этом методы, основанные на управлении сетями связи в форме обратной связи, используются для решения задач резервирования пропускной способности и балансировки трафика [2], и не используются для решения задач перераспределения ресурса пропускной способности, в том числе в ССПД НАКУ КА.

Статья посвящена постановке задачи оптимального управления ССПД НАКУ КА в форме обратной связи (в форме управления по состоянию), а также содержит предложения по ее решению.

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Сеть связи и передачи данных НАКУ КА функционально предназначена для передачи информационного трафика, который включает в себя:

- потоки информации автоматизированной системы управления космическими аппаратами (АСУ КА): телеметрической, частотно-временной, командно-программной, технологической, эфемеридной;
- потоки информации реального времени: телефонии, видео-конференц-связи;
- потоки данных (файлы различных офисных приложений).

Сеть связи и передачи данных НАКУ КА технически состоит из следующих элементов (рис. 1):

- коммутационного оборудования, размещенного совместно с радиоэлектронными средствами управления космическими аппаратами, предназначенного для передачи потоков телеметрической информации, измерений текущих навигационных параметров, технологической и командно-программной информации, частотно-временной и эфемеридной информации;

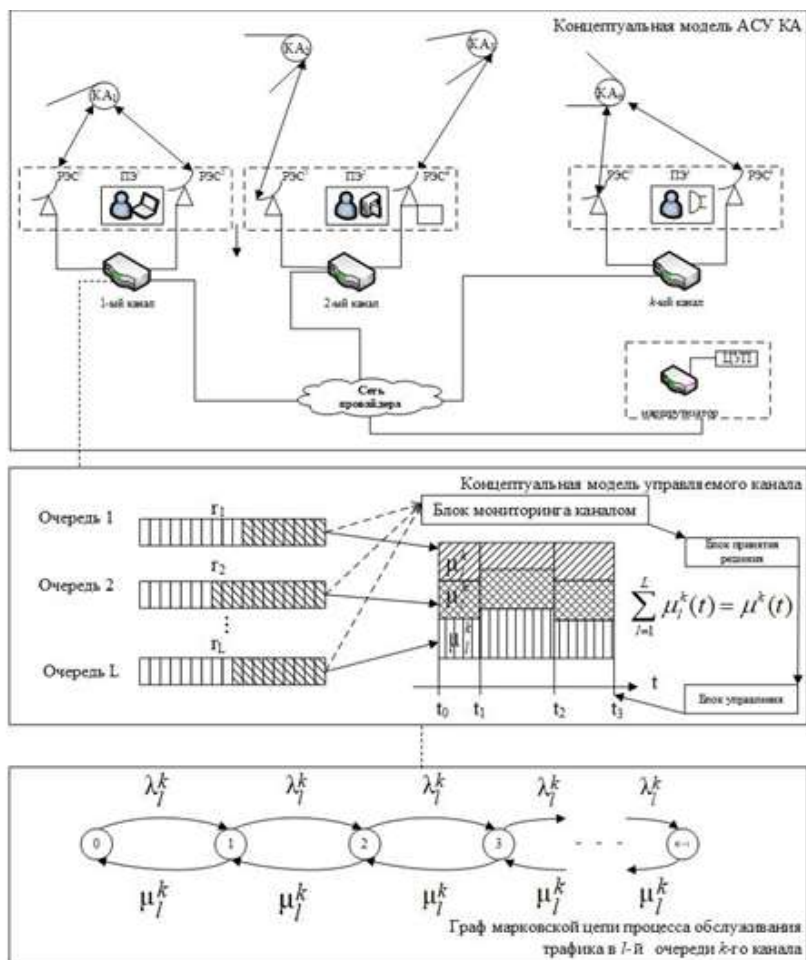


Рис. 1. Концептуальная модель процесса функционирования ССПД НАКУ КА

- коммутационного и абонентского оборудования телефонной и видео-конференц-связи, передачи данных, предназначенного для обеспечения задач управления подразделениями;
- линий и каналов спутниковой и волоконно-оптической связи.

Передача информации между пунктами эксплуатации (ПЭ) осуществляется либо с использованием арендованных каналов связи, либо с использованием каналов связи системы спутниковой связи «Приморка-М». Особенность организации связи через арендованные каналы состоит в том, что оперативно, т. е. в темпе поступления информации, изменить объем выделенной пропускной способности или перераспределить ее невозможно. В свою очередь, механизмы управления радиоресурсом системы спутниковой связи предусматривают оперативное изменение объема выделенного ресурса под текущие потребности.

Жесткое закрепление пропускной способности каналов связи между отдельными потоками информации приводит к неэффективному использованию ограниченной емкости выделенных каналов связи. Реконфигурация таких каналов производится, как правило, администраторами сети вручную в режиме отложенного решения возникших проблем.

Оперативное управление ресурсами ССПД НАКУ КА возможно на основе непрерывного контроля и мониторинга состояния очередей граничных маршрутизаторов и выработки оперативных решений по перераспределению пропускной способности между отдельными очередями в темпе поступления трафика.

Анализ работ [2–6] показал, что неточности в расчете пропускной способности каналов связи, обусловленные использованием классического подхода к расчету, основанного на предположении о стационарности входных потоков, приводит, зачастую, к существенному снижению качества обслуживания потоков, являющихся нестационарными. Так, ошибки в расчете требуемой пропускной способности канала на 50% приводят к снижению эффективной пропускной способности (отношению фактически используемой пропускной способности к общему объему выделенной пропускной способности) на величину 10–30% и, как следствие, к неприемлемому снижению качества обслуживания потоков трафика. Необходимо отметить, что алгоритмы управления скоростью обслуживания в сетях связи [4–6] разрабатываются на основе заранее сформированных решений и не являются алгоритмами в форме реальной связи.

Анализ современных работ [5, 9–12] показывает, что при решении задач синтеза алгоритмов управления системами массового обслуживания в качестве управляемых параметров используются, как правило, приоритетность и интенсивность обслуживания. При этом идеи, сформулированные в работах [13–15], получили развитие для случая использования описания реальных систем стационарными моделями. В случае описания реальных систем нестационарных моделей возникает ряд сложностей, которые связаны с проблемой вывода для каждого из вариантов описания вероятностного процесса, отличного от простейшего потока.

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ СЕТИ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ**

Сеть передачи данных включает в себя  $K$  командно-измерительных комплексов, каждый из которых имеет канал связи с ЦУП КА. То есть количество каналов в ССПД НАКУ ОГ КА принято равным  $K$ . Каждый из  $K$  каналов может обслуживать  $L$  очередей трафика различного класса обслуживания. Обслуживание каждой очереди обеспечивается буфером объемом  $R$  пакетов.

Технически ССПД НАКУ ОГ КА строится с использованием графических маршрутизаторов, каждый из которых имеет на внешних интерфейсах либо выход на оператора связи (с предоставлением услуги  $L3$ ), либо на станцию спутниковой связи «Приморец-М» («Примо-

рец»). При этом в статье решается задача распределения пропускной способности виртуального канала между логическими подканалами, каждый из которых обслуживает поток трафика определенного класса (одну из  $L$  очередей).

Технологическая оснастка такого управления строится, как правило, на использовании возможностей протоколов Telnet, SSH или веб-интерфейсов и производится в ручном режиме оператором дистанционно. В автоматическом режиме управление маршрутизаторами строится на основе применения возможностей протокола SNMP v.3, который имеет в своей структуре методы *get* («взять параметры») и *set* («установить параметры»). Таким образом, задача управления ССПД НАКУ ОГ КА, построенной по принципу «звезда», сводится к задаче управления долями пропускной способности внешних интерфейсов граничных маршрутизаторов.

Фиксированная пропускная способность одного внешнего канала обозначается в работе  $\mu^k$ , где  $k = \overline{1, K}$ , а доля пропускной способности такого канала, выделенная для обслуживания  $l$ -канала ( $l = \overline{1, L}$ ) обозначается  $\mu_l^k = \mu^k u_l^k$ , где  $u_l^k \in (0, 1)$  – управляющий параметр  $\sum_{l=1}^L u_l^k = 1$ .

Описать динамику изменения состояния одной из очередей можно с использованием графа марковской цепи, представленной на рис. 1. Если параметры входящего потока и потока обслуживания меняются во времени по известному закону, то модель обслуживания потока трафика одного типа одноканальным устройством с ограниченной очередью описывается системой уравнений Колмогорова – Чепмена с нестационарными параметрами [13–15]:

$$\begin{cases} \dot{p}_{i0}^k(t) = -\lambda_i^k(t) p_{i0}^k(t) + \mu_i^k(t) p_{i1}^k(t); \\ \dot{p}_{i1}^k(t) = -(\mu_i^k(t) + \lambda_i^k(t)) p_{i1}^k(t) + \lambda_i^k(t) p_{i0}^k(t) + \mu_i^k(t) p_{i2}^k(t); \\ \vdots \\ \dot{p}_{ii}^k(t) = -(\mu_i^k(t) + \lambda_i^k(t)) p_{ii}^k(t) + \lambda_i^k(t) p_{ii-1}^k(t) + \mu_i^k(t) p_{ii+1}^k(t); \\ \vdots \\ \dot{p}_{ir+1}^k(t) = \lambda_i^k(t) p_{ir}^k(t) - \mu_i^k(t) p_{ir+1}^k(t) \\ \sum_{i=0}^{R+1} p_{ii}^k(t) = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k$  – номер канала,  $k = \overline{1, K}$ ;

$n$  – номер космического аппарата,  $n = \overline{1, N}$ ;

$l$  – номер очереди,  $l = \overline{1, L}$ ;

$\lambda_l^k$  – интенсивность поступления трафика в  $l$ -ю очередь  $k$ -го канала;

$\mu_l^k$  – интенсивность обслуживания  $l$ -й очереди  $k$ -м каналом;

$p_{ii}^k$  – вероятность пребывания  $i$ -го количества пакетов в  $l$ -й очереди  $k$ -го канала.

В системе (1) априорно принимается, что закон изменения интенсивности входного потока по каждой из очередей изменяется по известному закону  $\lambda_{ir+1}^k(t)$ . В этом случае закон изменения пропускной способности канала, выделенной на очередь, определяется целью управления очередью и задается критерием минимума неиспользуемой пропускной способности при ограничениях на качество обслуживания. Качество обслуживания может быть оценено показателями количества потерь пакетов мультимедийного трафика или длительностью пребывания пакетов в системе обслуживания.

В первом случае оценивается значение вероятности  $p_{R+1}$ , имеющей смысл вероятности отказа в обслуживании или процента потерь пакетов трафика.

Во втором случае оценивается величина  $\bar{t}_c = \frac{\sum_{i=2}^{r+1} (i-1)p_i^k i}{\lambda_l^k (1-p_{R+1}^k)} + \frac{1}{\mu_l^k}$ , имеющая смысл математического ожидания суммарного времени нахождения пакета данных в  $l$ -й очереди  $k$ -го канала и в самом  $k$ -м канале.

Система (1) может быть преобразована к векторно-матричному виду за счет введения  $u_l^k(t) = \frac{\mu_l^k(t)}{\mu^k}$  следующим образом:

$$\dot{P}_l^k(t) = [\lambda_l^k(t)A_\lambda] P_l^k(t) + [\mu^k u_l^k(t)B_\mu] P_l^k, \quad (2)$$

где

$$P_l^k = \begin{bmatrix} p_{l0}^k(t) \\ p_{l1}^k(t) \\ \vdots \\ p_{li}^k(t) \\ \vdots \\ p_{lR+1}^k(t) \end{bmatrix}; A_\lambda = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}; B_\mu = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

В формуле (2) используются следующие обозначения:  $\mu^k$  – пропускная способность  $k$ -го канала;  $u_l^k$  – доля пропускной способности  $k$ -го канала, выделяемой для обслуживания  $l$ -й очереди,  $u_l^k \in (0,1)$ .

Тогда модель обслуживания  $L$  очередей  $k$ -м каналом можно записать в виде:

$$\dot{P}^k(t) = A_\lambda^k(t)P^k(t) + [U^k(t)B_\mu^k]P^k(t), \quad (3)$$

где

$$A_\lambda^k(t) = \begin{bmatrix} \lambda_1^k(t)A_\lambda & \emptyset & \dots & \emptyset & \dots & \emptyset \\ \emptyset & \lambda_2^k(t)A_\lambda & \dots & \emptyset & \dots & \emptyset \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \emptyset & \emptyset & \dots & \lambda_l^k(t)A_\lambda & \dots & \emptyset \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \emptyset & \emptyset & \dots & \emptyset & \dots & \lambda_L^k(t)A_\lambda \end{bmatrix}; B_\mu^k = \text{diag}(\mu_l^k B_\mu, l = \overline{1, L});$$

$$U^k(t) = \text{diag}(u_l^k(t)E_{[R+1, R+1]}, l = \overline{1, L}); \sum_{i=1}^L u_i^k = 1; P_k(t) = \text{col}(p_l^k B_\mu, l = \overline{1, L}).$$

На основе моделей (2) и (3) может быть получена модель управления ССПД НАКУ КА. Для этого введем в рассмотрение вектор  $P(t) = \text{col}(P^k(t), k = \overline{1, K})$  вероятностей состояний всех очередей во всех каналах ССПД. Модель управления ССПД НАКУ КА тогда запишется в следующем виде:

$$\dot{P}(t) = A_\lambda(t)P(t) + [U(t)B_\mu]P(t), \quad (4)$$

где  $A_\lambda(t) = \text{diag}(A_\lambda^k(t), k = \overline{1, K})$ ;  $U(t) = \text{diag}(U^k(t), k = \overline{1, K})$ ;  $B_\mu = \text{diag}(B_\mu^k, k = \overline{1, K})$ .

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТИ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Формальная постановка задачи оптимального управления ССПД НАКУ КА включает в себя формализацию показателя качества, системы ограничений и критерия выбора.

Показатель качества функционирования системы управления формулируется как эффективная пропускная способность канала управления, т. е. как доля времени функционирования системы в режиме обслуживания. Такая доля времени может быть выражена через сумму вероятности состояния графа марковской цепи, характеризующих наличием в системе хотя бы одного пакета:

$$\mu_l^k \sum_{i=1}^{r+1} p_{ii}^k \rightarrow \max, \forall k, \forall l,$$

что аналогично минимизации доли времени, в течение которого система простаивает:

$$\mu_l^k p_{l0}^k \rightarrow \min.$$

Исходя из этих соображений показатель качества функционирования системы управления ССПД НАКУ КА характеризует долю неиспользуемой пропускной способности всей сети связи и может быть записан в виде

$$J(U, t) = \sum_{k=1}^K \mu^k \sum_{l=1}^L u_l^k(t) p_{l0}^k(t), \quad (5)$$

Система ограничений включает в себя ограничения по качеству обслуживания различных видов трафика, ограничения общего ресурса канала и нормировочное ограничение значений на вероятности состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^{R+1} p_{ii}^k(t) = 1, \text{ для } \forall k, \forall l; \\ \sum_{l=1}^L u_l^k(t) = 1, \text{ для } \forall k; \\ p_{lR+1}^k \leq 0,01, \forall k, \forall l_1 \in L_1; \\ \frac{\sum_{i=2}^{R+1} (i-1) p_{l_2 i}^k(t)}{\lambda_{l_2}^k(t)(1-p_{l_2 R+1}^k(t))} + \frac{1}{\mu^k u_{l_2}^k(t)} \leq \bar{t}^{зад}; \\ l_2 \in L_2, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $L_1$  – множество очередей, для которых допустимы потери пакетов трафика;

$L_2$  – множество очередей, для которых допустимы задержки в обслуживании.

С учетом показателя (5) и системы ограничений (6) может быть сформулирован критерий оптимального выбора:

$$\begin{aligned} U^{opt}(t) &= \arg \min J(U, t); \\ u(t) &\in U_{\Delta} \end{aligned} \quad (7)$$

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТИ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Модель управления ССПД НАКУ КА (4) линейна относительно компонент вектора состояния  $P(t)$ , однако нелинейна относительно вхождения вектора управляющих параметров в систему уравнений (такие системы получили название «аффинных»). Для синтеза алгоритма управления линейными системами используются подходы [16–18], хорошо известные в теории оптимального управления динамическими системами. Однако для нелинейных систем наиболее популярным подходом является подход, связанный с линеаризацией исходной системы уравнений вблизи требуемого стационарного состояния  $P^{\text{треб}} = [p_s^{\text{треб}}, s=1, \overline{S}]^T$  и соответствующими этому состоянию параметрами  $\mu_l^k(t) < \mu_l^{k \max}$ ,  $l=1, \overline{L}$  и  $\lambda_l^k(t)$ ,  $l=1, \overline{L}$ ,  $k=1, \overline{K}$ . Недостатком такого подхода является предположение об относительно небольших отклонениях нестационарного процесса от стационарного состояния  $P^{\text{треб}}$ , тогда как для рассматриваемого случая такие отклонения могут быть значительными и такой подход становится неприменимым. В это случае может быть применен метод логико-аналитического синтеза [19], хорошо зарекомендовавший себя для систем робастного управления сложными динамическими объектами типа космических аппаратов с присоединенными упругими элементами конструкции.

Модели управления ССПД НАКУ КА (4) соответствует модель измерителя

$$Y(t) = C(t)P(t), \quad (8)$$

где  $Y(t)$  – в общем случае  $Q$ -мерный вектор измеряемых параметров;

$C(t)$  –  $Q \times S$ -мерная матрица измерителя, где  $S = LK(R+2)$ .

Алгоритм управления ССПД НАКУ КА в этом случае может быть определен в виде

$$\mu_l^k(t) = \begin{cases} \mu_l^{k \max}, & \text{при } p_{R+1l}^k \geq p^{\text{треб}}; \\ \mu_l^{k \min}, & \text{при } p_{R+2l}^k < p^{\text{треб}}. \end{cases} \quad (9)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе авторами представлена формализация задачи оптимального управления ССПД НАКУ КА в реальном масштабе времени и предложено направление ее решения на основе метода логико-аналитического синтеза. Кроме того, при формировании структуры оптимального управления учтена реактивность системы управления, а также чувствительность обратной связи в зависимости от ширины временного окна, включающего измерения числа обслуженных и потерянных пакетов.

## Список используемых источников

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М. : Наука, 2006. – 408 с.
2. Романюк О. В., Егоров И. Ю. Исследование способов балансировки трафика в транспортной сети с коммутацией пакетов // XXVII Международная Объединенная Академия Наук. – СПб., 2020. – С. 9–13.



3. *Макаренко С. И.* Анализ математических моделей информационных потоков общего вида и степени их соответствия трафику сетей интегрального обслуживания // Вестник ВГТУ. – 2012. – Т. 8, № 8. – С. 28–35.
4. *Макаренко С. И., Татарков М. А.* Моделирование обслуживания нестационарного информационного потока системой связи со случайным множественным доступом // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 1. – С. 44–50.
5. *Бурлаков С. О., Брыдченко А. В.* Анализ нестационарного режима обслуживания заявок в сети спутниковой связи // Труды учебных заведений связи. – 2006. – № 175. – С. 10–15.
6. *Будко П. А., Рисман О. В.* Многоуровневый анализ информационно-телекоммуникационных систем. – СПб. : ВАС, 2011. – 475 с.
7. *Камнев В. Е.* Исследование алгоритмов управления и предотвращения перегрузок в спутниковой АТМ сети // 4-я международная конференция «Спутниковая связь-2000». 26–29 сентября 2000 г., Москва. – М. : МЦНТИ, 2000. – Т. 2. – С. 7–10.
8. *Назаров А. Н., Сычев К. И.* Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск : Поликом, 2010. – 389 с.
9. Управляемая система массового обслуживания с эластичным трафиком и сигналами для анализа нарезки ресурсов в сети радиодоступа / А. С. Власкина [и др.] // Информатика и ее применение. – 2022. – Т. 16, № 3. – С. 90–96.
10. *Семихин К. В., Иванова Ю. С.* Численный анализ диффузионной аппроксимации одноканальной системы массового обслуживания с управляемыми параметрами загрузки и обработки // Моделирование и анализ данных. – 2019. – № 2. – С. 21–30.
11. *Кудрявцева Е. Н., Росляков А. В.* Применение теории сетевого исчисления к исследованию систем массового обслуживания с обратной связью // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – № 1. – С. 17–21.
12. *Назаров А. А.* Управляемые системы массового обслуживания и их оптимизация. – Томск, 1984. – 208 с.
13. *Перепелкин Е. А.* Управление динамическими системами // Вестник Томского государственного университета. – 2020. – № 2. – С. 4–9.
14. *Перепелкин Е. А.* Робастное управление дискретной системой массового обслуживания // Вестник Томского государственного университета. – 2020. – № 3. – С. 21–28.
15. *Новиков Е. А., Макаренко С. И.* Оперативное управление ресурсом АТМ-коммутатора при обеспечении заданного качества обслуживания нестационарных информационных потоков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – № 1. – С. 17–21.
16. *Андреева Е. А., Цирулева В. М.* Вариационное исчисление и методы оптимизации : учеб. пособие. – М. : Высш. шк., 2006. – 584 с.
17. *Куропаткин В. П.* Оптимальные и адаптивные системы : учеб. пособие. – М. : Высш. шк., 1980. – 287 с.
18. *Пантелеев А. В.* Вариационное исчисление в примерах и задачах : учеб. пособие. – М. : Высш. шк., 2006. – 272 с.
19. *Мануйлов Ю. С.* Метод логико-аналитического синтеза в задачах оптимального и адаптивного управления. – МО СССР, 1986. – 188 с.

А. С. Гарагуля,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
В. С. Куликов;  
Г. Н. Мальцев,  
*доктор технических наук, профессор*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ В УСЛОВИЯХ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ**

Рассмотрено влияние на помехоустойчивость радиоэлектронных систем группового управления космическими аппаратами многоспутниковых космических систем внутрисистемных помех, обусловленных взаимным влиянием одновременно работающих каналов управления с кодовым разделением. Предложено формализованное описание внутрисистемных помех в радиоэлектронной системе группового управления космическими аппаратами с кодовым разделением каналов при использовании фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе псевдослучайных последовательностей. Проведено исследование помехоустойчивости радиоэлектронной системы группового управления космическими аппаратами в условиях внутрисистемных помех при кодовом разделении каналов и проанализированы связанные с влиянием внутрисистемных помех ограничения увеличения числа каналов управления космическими аппаратами в одной радиоэлектронной системе.

Ключевые слова: радиоэлектронные системы группового управления космическими аппаратами, кодовое разделение каналов, помехоустойчивость, псевдослучайные последовательности, внутрисистемные помехи.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время одним из ведущих направлений развития мировой космической деятельности является разработка и развертывание многоспутниковых космических систем [1]. Это обусловлено технологическими достижениями в области космического приборостроения и достоинствами многоспутниковых космических систем при решении задач обеспечения глобальной связи и дистанционного зондирования Земли. Число космических аппаратов (КА) в существующих и разрабатываемых многоспутниковых космических системах составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч и выбирается исходя из условий гарантированного обеспечения связью абонентов в заданных зонах обслуживания и круглосуточного наблюдения заданных районов земной поверхности. В Российской Федерации разработка многоспутниковых космических систем ведется в соответствии с Федеральной целевой программой «Сфера» и дорожной картой «Перспективные космические системы и сервисы», в рамках которых предусматривается развертывание многоспутниковых космических систем, включающих сотни КА [2, 3].

Существенное увеличение числа КА в составе орбитальной группировки многоспутниковой космической системы требует соответствующего увеличения числа проводимых сеансов управления КА и реализации принципов ситуационного управления, при котором ограниченное число наземных радиоэлектронных систем (РЭС) управления КА из состава наземного комплекса управления космической системы непрерывно перераспределяется для управления различными КА с учетом текущих приоритетов решаемых ими задач [4, 5]. В этих условиях для управления КА многоспутниковых космических систем могут быть использованы наземные РЭС группового управления КА, позволяющие на основе использования методов множественного доступа одновременно проводить сеансы управления несколькими КА, находящимися в зоне радиовидимости РЭС. Одним из вариантов построения такой РЭС группового управления КА является реализация кодового разделения каналов при использовании фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе псевдослучайных

последовательностей (ПСП). Такой подход широко используется в наземных системах подвижной радиосвязи с кодовым разделением каналов [6, 7]. При этом каналы управления, одновременно формируемые в РЭС группового управления КА, будут создавать взаимные внутрисистемные помехи.

В настоящей статье рассмотрено влияние внутрисистемных помех на помехоустойчивость РЭС группового управления КА с кодовым разделением каналов при использовании фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП и проанализированы связанные с влиянием внутрисистемных помех ограничения увеличения числа каналов управления КА в одной РЭС.

### ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ С КОДОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

При анализе РЭС группового управления КА с кодовым разделением каналов под внутрисистемными помехами будем понимать помехи, вызванные влиянием на рассматриваемый канал управления КА сигналов других каналов управления, передаваемых в составе сигнала группового управления наземной РЭС со слабонаправленной антенной [7]. Возникновение внутрисистемных помех связано с работой всех каналов РЭС с кодовым разделением каналов в одном частотном диапазоне с различными структурами модулирующих ПСП, не обладающими идеальными корреляционными свойствами – отсутствием боковых пиков автокорреляционной функции (АКФ) отдельной ПСП и пиков взаимокорреляционной функции (ВКФ) различных ПСП. При объединении нескольких каналов управления КА в сигнал группового управления и корреляционном приеме сигналов в каждом канале отклики корреляционного приемника, соответствующие пикам АКФ и ВКФ ПСП различных канальных сигналов, складываются, тем самым снижая качество приема сигналов. Как следствие, увеличивается вероятность ошибок при выделении символов и сообщений передаваемой информации.

Для формализации задачи исследования влияния внутрисистемных помех на прием сигналов при групповом управлении КА многоспутниковых космических систем рассмотрим ансамбль двоичных модулирующих ПСП  $\mathbf{a}_v = (a_{v,1}, a_{v,2}, \dots, a_{v,l})$ ,  $v \in V$ ,  $l \in L$ , где  $a_{v,l} \in \{-1; 1\}$  – символы ПСП,  $V$  – объем ансамбля,  $L$  – число символов в периоде (длина) ПСП. В большинстве случаев длительность символа кода передаваемых сообщений равна длительности периода ПСП  $T$ . Корреляционные свойства используемых ПСП характеризуются АКФ  $\rho_a(m)$  и ВКФ  $\rho_b(m)$ , где  $m$  – величина сдвига, выраженная в числе символов. Под основным пиком АКФ понимается значение  $\rho_a(m)$ , при  $m = 0 \bmod L$ , под боковыми пиками АКФ понимаются все остальные значения  $\rho_a(m)$ , при  $m \neq 0 \bmod L$ , в качестве пиков ВКФ могут рассматриваться любые значения  $\rho_b(m)$ ,  $m = 0, \dots, L-1$ .

Фазоманипулированный сигнал с расширением спектра на основе ПСП, используемый в РЭС управления КА, может быть представлен в следующем виде:

$$S(t) = \sqrt{2P_c} d(t) p(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $P_c$  – мощность передаваемого сигнала;  
 $d(t)$  – функция окна, соответствующая длительности периода ПСП  $T$ ,

$$d(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t < 0, t > T; \end{cases}$$

$p(t)$  – модулирующая (расширяющая) функция, соответствующая фазовой манипуляции  $[0, \pi]$  сигнала символами ПСП  $a_{v,l} \in \{-1; 1\}$ ,

$$p(t) = \sum_{n=1}^M (-1)^{a_{v,j}} u[t - (n-1)\Delta t],$$

где  $\Delta t$  – длительность символа ПСП;

$f_0$  – несущая частота сигнала;

$\varphi_0$  – начальная фаза сигнала.

При общем числе  $N_{\text{КАН}}$  одновременно управляемых КА и, соответственно, канальных сигналов, объединяемых в сигнал группового управления, сигнал управления  $n$ -м КА в составе сигнала группового управления обозначим в виде  $S_n(t)$ ,  $n = 1, \dots, N_{\text{КАН}}$ . Каждому канальному сигналу  $S_n(t)$  соответствует своя модулирующая ПСП  $\mathbf{a}_n$ . Соответственно  $n$ -й канальный сигнал может быть обозначен в виде  $S_n(t, \mathbf{a}_n)$ . Тогда результирующий сигнал группового управления КА при объединении  $N_{\text{КАН}}$  каналов определяется выражением

$$S(t) = \sum_{n=1}^{N_{\text{КАН}}} S_n(t, \mathbf{a}_n). \quad (2)$$

При передаче сигнала группового управления КА (2) наземной РЭС со слабонаправленной антенной сигнал, принимаемый на каждом КА, с точностью до энергетических потерь при распространении сигнала от РЭС до КА также представляет собой сумму вида (2). Внутрисистемные помехи образуются при приеме канального сигнала  $S_k(t, \mathbf{a}_k)$  в  $k$ -м канале управления КА под влиянием остальных канальных сигналов  $S_n(t, \mathbf{a}_n)$ ,  $n = 1, \dots, N_{\text{КАН}}$ ,  $n \neq k$ , в составе сигнала группового управления  $S(t)$ .

Корреляция  $z_k(\mathbf{a}_k)$  группового сигнала  $S(t)$  и  $k$ -го канального сигнала  $S_k(t, \mathbf{a}_k)$ , модулированного ПСП  $\mathbf{a}_k$ , являющегося сигналом управления  $k$ -м КА, может быть представлена следующим образом:

$$z_k(\mathbf{a}_k) = \int_0^T S(t) S_k(t, \mathbf{a}_k) dt. \quad (3)$$

В данном случае рассматривается прием группового сигнала  $S(t)$   $k$ -м КА без учета воздействия внутреннего шума и внешних помех. Это связано с необходимостью исследования влияния на прием сигнала управления  $k$ -м КА только внутрисистемных помех. При этом будет рассматриваться синхронная передача сигналов управления различными КА в составе сигнала группового управления, что имеет место при синхронном формировании в наземной РЭС различных модулирующих ПСП и передаче сигнала группового управления в каналах «РЭС–КА» одновременно нескольким КА, находящимся в зоне радиовидимости РЭС, с использованием одной слабонаправленной антенны.

В предположении, что в составе сигнала группового управления обязательно имеется сигнал управления  $k$ -м КА, выражение (2) можно представить в виде

$$S(t) = S_k(t, \mathbf{a}_k) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^{N_{\text{КАН}}} S_n(t, \mathbf{a}_n). \quad (4)$$

При подстановке выражения (4) в выражение (3) получаем

$$z_k(\mathbf{a}_k) = \int_0^T \left( S_k(t, \mathbf{a}_k) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^{N_{\text{КАН}}} S_n(t, \mathbf{a}_n) \right) \cdot S_k(t, \mathbf{a}_k) dt. \quad (5)$$

Раскрыв скобки в подынтегральном выражении в правой части выражения (5) корреляцию  $z_k(\mathbf{a}_k)$  можно представить в следующем виде:

$$z_k(\mathbf{a}_k) = \int_0^T S_k(t, \mathbf{a}_k) \cdot S_k(t, \mathbf{a}_k) dt + \int_0^T \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^{N_{\text{КАН}}} S_n(t, \mathbf{a}_n) \cdot S_k(t, \mathbf{a}_k) dt. \quad (6)$$

В правой части выражения (6) первое слагаемое описывает отклик корреляционного приемника  $k$ -го КА на «свой»  $k$ -й каналный сигнал, а второе слагаемое – отклик корреляционного приемника  $k$ -го КА на внутрисистемные помехи, обусловленные другими каналными сигналами, передаваемыми в составе сигнала группового управления  $S(t)$ .

Будем характеризовать ПСП  $\mathbf{a}_v$ ,  $v \in V$ , составляющие используемый ансамбль ПСП  $A$ , корреляционными параметрами:

$|\rho_\theta|_{\max}$  – максимальное значение модулей пиков ВКФ;

$|\rho_\theta|_{\text{cp}}$  – математическое ожидание модулей пиков ВКФ.

Предположим, что эти корреляционные параметры равны для всех ПСП ансамбля  $A$ , используемых при формировании сигнала группового управления  $S(t)$ . Тогда сумму во втором слагаемом выражения (6) можно представить в виде произведения корреляции сигнала  $S_k(t, \mathbf{a}_k)$  и некоторого усредненного сигнала  $S_i(t)$ , обладающего худшими корреляционными свойствами для рассматриваемого ансамбля ПСП, на количество каналов в сигнале группового управления без учета  $k$ -го сигнала. В результате выражение (6) преобразуется к следующему виду:

$$z_k(\mathbf{a}_k) = \int_0^T S_k(t, \mathbf{a}_k) \cdot S_k(t, \mathbf{a}_k) dt + (N_{\text{КАН}} - 1) \int_0^T S_i(t) \cdot S_k(t, \mathbf{a}_k) dt. \quad (7)$$

В выражении (7) второе слагаемое правой части выражения является представлением отклика на исследуемые внутрисистемные помехи корреляционного приемника при приеме сигнала  $S_k(t, \mathbf{a}_k)$   $k$ -го канала управления КА. Влияние внутрисистемных помех на прием каналных сигналов определяется величиной боковых пиков корреляционной функции принятой реализации группового сигнала  $S(t)$  и  $k$ -го каналного сигнала  $S_k(t, \mathbf{a}_k)$ . Тогда при объединении большого числа каналов управления КА в сигнале группового управления максимальная высота бокового пика рассматриваемой корреляционной функции будет приближаться к высоте основного пика  $|\rho_{\text{вп}}| \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \rho_{\text{о.п.}}$ , что сделает реализацию кодового разделения каналов невозможным [8].

Анализ воздействия внутрисистемной помехи на сигнал отдельного канала в сигнале группового управления КА при применении определенного ансамбля ПСП требует рассмотрения условий, когда внутрисистемные помехи оказывают наибольшее влияние на рассматриваемый канал. Поэтому практический интерес представляет ситуация максимального увеличения бокового пика корреляционной функции  $|\rho_{\text{вп}}|$  при объединении в групповом сигнале управления различного количества каналов управления КА. Такая ситуация возможна, когда значение бокового пика корреляционной функции сигнала группового управления является результатом сложения значений максимального пика ВКФ сигнала  $k$ -го КА и сигнала управления  $n$ -м КА  $|\rho_\theta|_{\max}$  и усредненного значения ВКФ сигнала  $k$ -го КА с соседними каналами  $|\rho_\theta|_{\text{cp}}$ :

$$|\rho_{\text{вп}}| = |\rho_\theta|_{\max} + (N_{\text{КАН}} - 2) |\rho_\theta|_{\text{cp}}. \quad (8)$$

Определяемая выражением (8) величина  $|\rho_{\text{вп}}|$  характеризует наихудший случай влияния помехи множественного доступа на прием сигнала в отдельном канале управления КА. Для верификации предложенной модели воздействия внутрисистемных помех в сигнале группового управления на прием сигнала отдельного канала управления КА было проведено сравнение результатов аналитических оценок величины  $|\rho_{\text{вп}}|$  (математического моделирования) и имитационного моделирования. При имитационном моделировании в качестве ансамбля мо-

дулирующих ПСП был рассмотрен минимаксный квазиортогональный ансамбль ПСП Кердока [6], удовлетворяющий критериям выбора ансамблей для реализации кодового разделения каналов в РЭС группового управления КА [8]. В табл. 1 представлены значения ВКФ для ПСП минимаксного квазиортогонального ансамбля Кердока с длиной  $L=1022$ .

Таблица 1

**Значения корреляционных функций  
квазиортогонального ансамбля ПСП Кердока**

Параметр	Значение
Максимальное значение модулей боковых пиков АКФ, $ \rho_a _{\max}$	0,08
Математическое ожидание модулей пиков АКФ, $ \rho_a _{\text{cp}}$	0,018
Максимальное значение модулей пиков ВКФ, $ \rho_\theta _{\max}$	0,09
Математическое ожидание модулей пиков ВКФ, $ \rho_\theta _{\text{cp}}$	0,018

На рис. 1 представлены зависимости нормированной величины бокового корреляционного пика в корреляторе приемного устройства при приеме сигнала группового управления  $S(t)$ , в который входит рассматриваемый сигнал  $k$ -го канала управления  $S_k(t, \mathbf{a}_k)$ , при увеличении количества складываемых каналов управления  $N_{\text{КАН}}$  по результатам математического и имитационного моделирования. Для осуществления имитационного моделирования в программной среде МАТАВ разработан блок формирования сигнала РЭС группового управления КА, позволяющий изменять количество объединяемых каналов управления при использовании модулирующих ПСП из квазиортогонального ансамбля Кердока длины  $L = 1022$  и объемом  $V = 512$ . Для каждого числа каналов моделировались 10 000 различных сочетаний ПСП и проводилось усреднение полученных результатов.

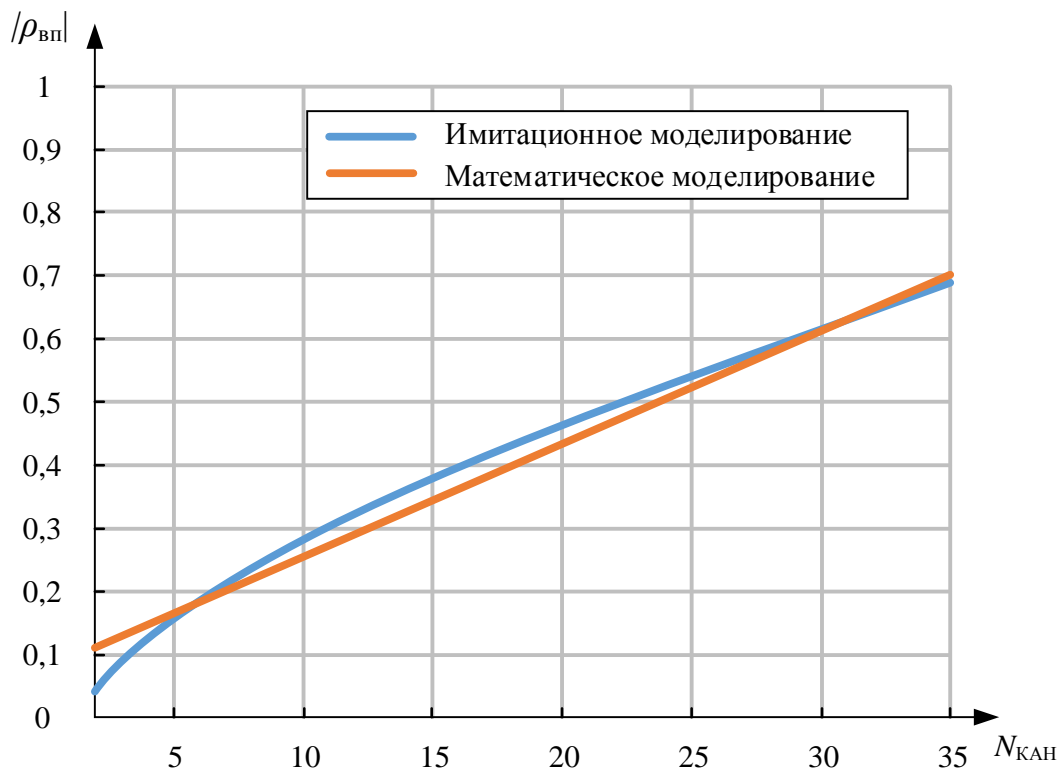


Рис. 1. Изменение высоты бокового корреляционного пика при увеличении количества каналов управления

По результатам исследования влияния внутрисистемных помех на прием сигнала отдельного канала управления КА можно сделать вывод о том, что представленное аналитическое описание позволяет с достаточной точностью описать изменение величины бокового пика ВКФ при исследовании усредненного варианта воздействия внутрисистемных помех. Погрешность при описании изменения нормированной величины корреляции сигнала отдельного канала управления КА и образующего внутрисистемную помеху сигнала группового управления не превышает значение 0,03. Полученный результат позволяет утверждать, что внутрисистемные помехи аддитивно воздействуют на сигналы отдельных каналов управления КА и возможно прогнозирование характера их воздействия на прием сигналов в каналах управления КА при наличии информации о корреляционных свойствах ансамбля ПСП, используемого для реализации кодового разделения каналов.

Таким образом, рассмотренное формализованное описание внутрисистемных помех позволяет исследовать помехоустойчивость РЭС группового управления КА при реализации кодового разделения каналов при использовании фазоманипулированных сигналов с расширением спектра на основе ПСП.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КОДОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ

Под помехоустойчивостью РЭС понимается ее способность противостоять мешающему воздействию помех. Применительно к РЭС группового управления КА при исследовании помехоустойчивости рассматривается влияние внутрисистемных помех на сигнал отдельного  $k$ -го канала управления КА  $S_k(t, \mathbf{a}_k)$ . Воздействие на прием канального сигнала внутреннего шума и внешних помех в настоящей работе не рассматривается.

При передаче сигналов управления КА в виде формализованных сообщений РЭС управления КА функционирует как РЭС передачи информации. Помехоустойчивость РЭС передачи информации характеризуется вероятностью ошибочного приема символов и сообщений [7]. Вероятность ошибочного приема символа кода  $P_0$  в РЭС передачи информации при приеме сигналов в условиях внутренних и внешних шумовых помех, описываемых моделью белого гауссовского шума, без кодового разделения каналов определяется выражением

$$P_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi_0 \left( \sqrt{2h_0} \right) \right], \quad (9)$$

где  $h_0$  – отношение приходящейся на символ энергии сигнала  $E_c$  к спектральной плотности мощности белого шума  $N_0$ ,  $h_0 = E_c/N_0$ ;

$\Phi_0(x)$  – специальная функция Крампа, определяемая выражением

$$\Phi_0(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du.$$

Кроме появления и воздействия внутрисистемных помех на прием сигналов в отдельных каналах управления КА реализация группового управления КА с кодовым разделением каналов приводит к уменьшению энергии канальных сигналов  $E_{ck}$  пропорционально увеличению их количества в составе группового сигнала управления при постоянной энергии группового сигнала  $E_c$  [9]:  $E_{ck} = E_c/N_{\text{КАН}}$ ,  $E_{ck} \xrightarrow{N_{\text{КАН}} \rightarrow \infty} 0$ ,  $E_c = \text{const}$ . Если  $P_c$  – мощность группового сигнала управления, то  $E_c = P_c T$  и величина  $h_0 = E_c/N_0$  представляет собой отношение сигнал/шум для сигнала группового управления.

Для определения вероятности ошибочного приема символа кода в условиях внутрисистемных помех необходимо рассмотрение варианта наихудшего воздействия внутрисистемных помех, при котором значение пика взаимокорреляционной функции  $k$ -го канала управления с одним из каналов является максимальным, а с остальными каналами управления находится на уровне средних значений [10]. Тогда выражение (9) для вероятности ошибочного приема символа кода  $P_0$  может быть преобразовано к виду

$$P_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi_0 \left( \frac{\sqrt{2h_0/N_{\text{КАН}}}}{1 + |\rho_{\text{вп}}|} \right) \right]. \quad (10)$$

В выражении (10) действие внутренних и внешних шумовых помех характеризует отношение сигнал/шум  $h_0$ , а действие внутрисистемных помех множественного доступа – величина  $|\rho_{\text{вп}}|$ , определяемая выражением (8), значение которой зависит от количества каналов управления  $N_{\text{КАН}}$ , максимального и среднего значений ВКФ  $|\rho_{\epsilon}|_{\text{max}}$  и  $|\rho_{\epsilon}|_{\text{cp}}$  соответственно. Выражение (10) позволяет учесть изменение энергии  $k$ -го канала управления в сигнале группового управления с увеличением числа объединяемых каналов  $N_{\text{КАН}}$  и воздействие внутрисистемных помех при заданных корреляционных свойствах рассматриваемого ансамбля модулирующих ПСП, применяемых для расширения спектра сигнала и кодового разделения каналов. С использованием данного выражения может быть исследована помехоустойчивость РЭС группового управления КА в условиях воздействия внутрисистемных помех в прямом канале управления КА «РЭС–КА». На рис. 2 представлена зависимость вероятности ошибочного приема символа кода  $P_0$  в прямом канале управления КА от отношения сигнал/шум для сигнала группового управления  $h_0$  при объединении различного количества каналов управления  $N_{\text{КАН}}$ .

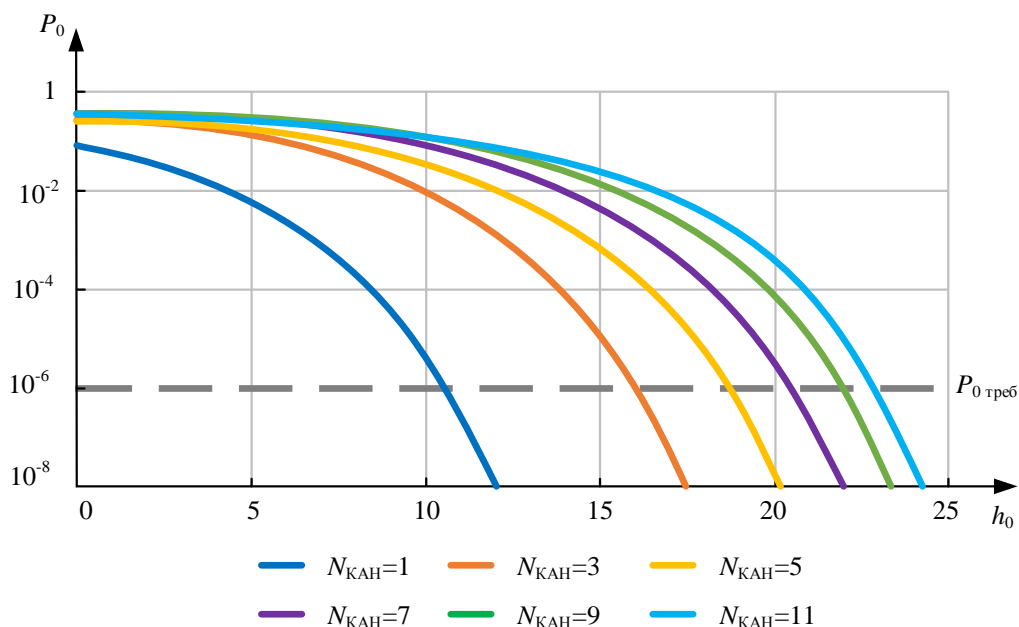


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки  $P_0$  при передаче информационного символа в прямом канале от  $h_0$  при сложении нескольких каналов управления

Из результатов, представленных на рис. 2 следует, что внутрисистемные помехи при реализации кодового разделения каналов оказывают существенное негативное воздействие на помехоустойчивость РЭС группового управления КА. Поэтому для обеспечения требуемой помехоустойчивости РЭС группового управления КА на уровне вероятности ошибочного



приема символа кода  $P_0 = 10^{-6}$  с увеличением количества каналов необходимо увеличение энергии сигнала группового управления за счет увеличения выходной мощности  $P_c$  передающего устройства РЭС. Так, при  $N_{\text{КАН}} = 3$  необходимо увеличение энергии группового сигнала на 6 дБ, а при  $N_{\text{КАН}} = 11$  – на 13 дБ.

Таким образом, предельное значение количества каналов, объединяемых в РЭС группового управления КА, определяется корреляционными свойствами используемого ансамбля ПСП и возможностями достижения требуемых энергетических характеристик приемной и передающей аппаратуры РЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено формализованное описание внутрисистемных помех в РЭС группового управления КА с кодовым разделением каналов и их влияние на прием сигналов в отдельном канале управления КА. Представленная модель внутрисистемных помех, обусловленных реализацией кодового разделения каналов, позволяет оценить увеличение боковых корреляционных пиков группового сигнала и оценить помехоустойчивость РЭС группового управления КА при объединении различного количества каналов управления. Сравнение результатов, полученных в ходе имитационного и математического моделирования, позволяет сделать вывод о достоверности предложенной модели.

Результаты исследования помехоустойчивости РЭС группового управления КА в условиях воздействия внутрисистемных помех показывает, что реализация кодового разделения каналов для увеличения количества сеансов управления, которые может провести РЭС группового управления КА одновременно, требует увеличения энергии группового сигнала. Так, при объединении в сигнале группового управления до 11 каналов управления КА требуется увеличение энергии группового сигнала до 13 дБ. Представленные выражения позволяют аналитически оценить максимальное количество каналов, объединение которых в РЭС группового управления КА возможно при обеспечении требуемой помехоустойчивости.

## Список используемых источников

1. Данилкин А. П., Козлов В. А. Мировые тенденции развития малых спутников // Экономические стратегии. – 2016. – № 6. – С. 136–149.
2. Потюпкин А. Ю. Управление многоспутниковыми космическими системами. – М.; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 292 с.
3. Раткин Л. С. Инновационные технологии XXI века на примере перспектив реализации космического проекта «Сфера» для научно-технологического обеспечения достижения приоритетных целей социально-экономического развития России // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2023. – № 18, т. 1. – С. 363–367.
4. Потюпкин А. Ю., Тимофеев Ю. А., Волков С. А. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2021. – Т. 8, вып. 3. – С. 11–19.
5. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками / А. Ю. Потюпкин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Т. 7, вып. 3. – С. 61–70.
6. К выбору сигнатурных ансамблей для нового поколения радиointерфейса системы ГЛОНАСС / Д. В. Гайворонский [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2009. – № 6. – С. 56–65.

7. *Ипатов В. П.* Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. – М. : Радио и связь, 1992. – 152 с.
8. *Гарагуля А. С., Козинев И. А., Куликов В. С.* Выбор структуры сигналов для группового управления космическими аппаратами многоспутниковой космической системы с кодовым разделением каналов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2023. – Т. 10, вып. 4. – С. 82–93.
9. *Варакин Л. Е.* Теория систем сигналов. – М. : Сов. радио, 1978. – 304 с.
10. *Мальцев Г. Н., Травкин В. С.* Оптимальный прием сложных фазоманипулированных сигналов в спутниковых радиоканалах в условиях внутрисистемных структурных помех // Информационно-управляющие системы. – 2006. – № 5. – С. 36–42.

С. Г. Алёхин,  
доктор технических наук, доцент;  
Р. Д. Иванов

## **КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЕСТЕСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ ГОДА И ИХ ОЦЕНКИ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

Излагается подход к оцениванию качественных показателей естественных климатических сезонов (ЕКС) года с учетом влияния астрономических факторов системы «Земля – Луна – Солнце». Рассмотрен механизм формирования ЕКС и их классификации. Получены оценки качественных показателей ЕКС.

Ключевые слова: естественные климатические сезоны, лунно-солнечные приливы, количественные и качественные показатели, оценки влияния.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность статьи обусловлена особенностями естественных климатических сезонов (ЕКС), учет которых имеет большое практическое значение в задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с помощью авиационных и космических средств в интересах сельского хозяйства, землепользования, лесоводства, геологии, океанографии, метеорологии, а также при мониторинге окружающей среды. Важно проводить ДЗЗ в те периоды времени, когда отражательно-излучательные характеристики конкретных объектов и фонов наблюдения наиболее информативны, т. е. когда при интерпретации полученных изображений высока вероятность идентификации объектов на местности. Такие периоды времени соответствуют естественным климатическим сезонам.

Ранее, в работах [1–3] были рассмотрены результаты исследований, посвященные вопросам определения естественных климатических сезонов года (ЕКС) и их характеристик. Несмотря на полученные удовлетворительные результаты был сделан вывод о том, что в науке задача относительно точного оценивания качественных показателей ЕКС до сих пор не решена. Для более точных оценок требуются знания и учет большого числа физических закономерностей, лежащих в основе формирования климатических условий того или иного района.

Качественные показатели ЕКС – это показатели, которые выражают (описывают, характеризуют) состояние (наличие/отсутствие) климатообразующих факторов в конкретные временные периоды года в данной местности, могут измерять масштаб явления, его интенсивность и др. Качественные показатели ЕКС оцениваются раздельно для теплого и холодного периодов года. ЕКС относятся к холодному периоду года если средние значения среднесуточной температуры воздуха этих сезонов ниже нуля. Для ЕКС теплого периода года – наоборот.

Например, для умеренного климатического пояса к качественным показателям ЕКС холодного периода года относятся:

- первый в году переход температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  к области отрицательных значений (номер сезона по порядку);
- первый в году переход температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  к области положительных значений (номер сезона по порядку);
- первый в году сезон, когда на поверхности земли устанавливается сплошной снежный покров;
- частота (вероятность) попадания значений среднесуточной температуры воздуха в их доверительный интервал для данного ЕКС.

К качественным показателям ЕКС теплого периода года относятся:

– первый в году сезон без снежного покрова;  
– частота (вероятность) попадания значений среднесуточной температуры воздуха в их доверительный интервал для данного ЕКС.

Следует учитывать, что в зависимости от географических характеристик исследуемого района, качественные показатели ЕКС выбираются и оцениваются отдельно для каждого сезона.

С одной стороны, если говорить о календарных сезонах года, то изменения климатообразующих процессов и явлений внутри них не такие значимые, как между сезонами, и чаще касаются лишь интенсивности этих процессов и явлений. Наиболее быстрые изменения наблюдаются в переходные сезоны, например, весной наблюдается резкое увеличение поглощаемой солнечной радиации, усиливается нагревание приземных масс воздуха, повышается интенсивность их трансформации, что естественно, так как солнечная радиация, пожалуй, главный климатообразующий фактор, управляющий всей климатической системой Земли.

Изменение количества поступающей на поверхность Земли солнечной радиации приводит к заметным изменениям остальных климатообразующих факторов [4]. Применительно к ЕКС, физические закономерности, характеризующие влияние солнечной радиации на их число и продолжительность, были учтены в работах [1–3] при классификации сезонов. Качественные показатели ЕКС при этом не оценивались, так как не удалось выявить каких-либо физико-статистических закономерностей, отражающих связь этих показателей с конкретными сезонами.

С другой стороны, необходимо отметить тот факт, что практически на всех широтах, за исключением полюсов, число ЕКС в течение года больше, чем календарных сезонов. В зависимости от широты, высоты и типа местности, ее близости к акваториям морей и океанов, абсолютных значений среднесуточной температуры воздуха, число ЕКС всегда больше четырех, в среднем их 8–10. Разумно предположить, что при оценивании качественных показателей ЕКС не учтены другие климатообразующие факторы, например астрономические, которые следует рассматривать в системе не «Земля – Солнце» или «Земля – Луна», а в системе «Земля – Луна – Солнце».

Проверке этого предположения посвящена настоящая статья.

## **ПРЕДЫСТОРИЯ ВОПРОСА И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСТРОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ**

При классификации ЕКС в работах [1–3] речь шла о корреляционном методе, где рассчитывались оценки коэффициентов корреляции значений аномалий среднесуточной температуры воздуха между 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 и 30-ми сутками каждого календарного месяца. Подробное содержание корреляционного метода описано в приведенных источниках литературы и здесь рассматриваться не будет. Важно поставить акцент на временном периоде, ограниченном именно календарным месяцем, т. е. отсчет времени при формировании выборки идет с первого числа календарного месяца. Далее будет показано, как это влияет на показатели ЕКС.

Корреляционный метод дает удовлетворительные результаты при решении большинства практических задач организации жизнедеятельности или планирования развития какого-либо региона. Однако ошибки в определении границ ЕКС и их продолжительности могут достигать 12–18 суток, в зависимости от исследуемого региона, а это ограничивает практическую ценность метода.

Учитывая, что при работе над корреляционным методом классификации ЕКС в большей степени были учтены климатические и синоптические факторы формирования климата в

широком смысле, дальнейшее его совершенствование без включения в него новых, астрономических факторов, не имеет смысла. Рассмотрим их.

Астрономические определения года основываются на периодах между повторениями различных астрономических событий, связанных с орбитальным движением Земли вокруг Солнца. Так, тропический год (365,2422 дня) привязан к видимому движению Солнца относительно экватора Земли и определяет смену календарных общепринятых времен года. Сидерический год (365,2564 дня) привязан к орбитальному движению Земли вокруг Солнца в инерциальной системе отсчета (относительно «неподвижных звезд»). Аномалистический год (365,259641 дня) связан с движением Земли относительно точек ее орбиты (перигелия и афелия).

В связи с тем, что параметры орбиты Земли и ориентация ее оси вращения по отношению к эклиптике медленно изменяются со временем, все определения года слегка отличаются. Ситуация усложняется, если определение года привязывается к суточному вращению Земли относительно Солнца (солнечные календари) или к взаимному положению Луны и Солнца относительно Земли (лунно-солнечные календари). Поскольку период обращения Земли вокруг Солнца (в любом определении), средний период осевого обращения Земли по отношению к Солнцу (средние солнечные сутки) и периоды обращения Луны вокруг Земли (сидерический, синодический, драконический месяцы) не соотносятся в точной пропорции, во всех существующих календарях приходится вводить те или иные поправки (високосные дни, дополнительные месяцы и т. п.), чтобы сохранить соизмеримость единиц счета времени, основанных на природных астрономических циклах (года, лунного месяца, солнечных суток).

Земля и Луна обращаются вокруг общего центра тяжести (барицентра). Влияние гравитационных сил Луны на природные процессы обнаружено на уровне длительных статистических наблюдений за климатическими и погодными факторами и известно давно [5]. В системе «Земля – Солнце» величина приливной силы (действующей на воздушные и водные массы) есть функция склонения и геоцентрического расстояния Луны (или Солнца). Амплитуда месячных колебаний склонения Луны изменяется с периодом 18,61 г. от 29° до 18°, из-за прецессии оси (регрессии узлов) лунной орбиты. Перигей лунной орбиты движется с периодом 8,85 г. Склонение и геоцентрическое расстояние Солнца изменяются с периодом 1 г. Имеются сведения о циклах колебаний в 200 лет, 1800 лет, 4000–5000 лет, свыше 10000 лет [6]. Кроме того, присутствуют квазициклы в 4, 35, 80, 100 лет. Все эти периоды действуют на вариации атмосферной циркуляции [7, 8]. Причем, чем глобальнее цикл, тем более сильные изменения климата он вызывает и тем большая амплитуда изменения температур его характеризует.

С древних времен люди замечали определенную периодичность в проявлении погодных явлений. Между лунно-солнечными приливами и вариациями погоды найдены тесные связи – приливы влияют на движения воздушных масс и вариации атмосферного давления. Повышенное давление, вызванное лунным приливом, из-за ясной погоды приводит днем летом к положительным аномалиям температуры воздуха, а ночью зимой – к отрицательным. В повторяемости особенностей атмосферной циркуляции обнаружена заметная периодичность в 355, 206, 29,5 и 27 суток, что соответствует циклам приливного Лунного года, полупериоду эвекции, периоду обращения Луны вокруг Земли и циклу обращения Солнца вокруг своей оси [9].

Смена фаз Луны и изменения в совместном положении планет солнечной системы отражаются на величине потока солнечной радиации. Луна – основной «помощник» в распределении солнечной энергии по поверхности Земли, регулятор космического излучения, электромагнитных полей, гравитационных возмущений в пределах солнечной системы на Земле.

Повторяемость в движении Луны тесно связана с погодой и ее многолетним режимом – климатом. Изменения климата синхронизированы с циклом лунного года, в результате сложения которого с солнечным годовым циклом возникают биения с периодом около 35 лет, в течение которых происходит циклическое изменение аномальных значений метеорологиче-

ских величин – температуры, давления, облачности и др., при этом первичным фактором является изменение облачности.

Несмотря на достаточную изученность этой связи, учитывать влияние Луны и вычислять уточненные значения соответствующих климатических показателей, аналогичных солнечным годовым нормам, в настоящее время крайне затруднительно. В основном причиной этого является потребность иметь большие ряды данных наблюдений. Некоторые ученые называют необходимую длину ряда в 186 и даже в 1860 лет. Другие, учитывая влияние гравитационных сил всех планет Солнечной системы, – до 700 млн. лет, что говорит об отсутствии двух одинаковых или хотя бы похожих в достаточной степени по погоде лет за всю историю наблюдений [4, 9, 10].

Таким образом, от года к году различия погодных процессов и явлений связаны с влиянием на них астрономических факторов системы «Земля – Луна – Солнце». Поэтому при классификации ЕКС корреляционным методом должна быть выбрана другая, отличная от календарной, система отсчета.

### **ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ**

По предложенному С. Б. Шоу в монографии «Agricultural meteorology» (1935) делению календарного года на четыре сезона границами четырех календарных сезонов считаются дни зимнего/летнего солнцестояний и весеннего/осеннего равноденствий. Началом года в таком случае считается день зимнего солнцестояния – 21 декабря.

С одной стороны, это суждение имеет под собой практическую основу, так как такой астрономический календарь построен на принципах циклической взаимосвязи конкретных дат с продолжительностью светлого и темного времени суток, в течение которого на земную поверхность поступает солнечная радиация. С другой стороны, в нем не учитывается воздействие такого масштабного астрономического фактора, как приливные силы в системе «Земля – Луна – Солнце».

Период полной смены всех лунных фаз называется в разных источниках синодическим периодом обращения Луны, лунацией или синодическим месяцем, и равен, в среднем, приблизительно 29,5 дням. Полный оборот Луны вокруг Земли относительно звезд называется сидерическим месяцем и длится 27,3 дня. Для изучения влияния приливных сил на геосферы Земли целесообразно использовать именно синодический период, длительность которого вычисляется по повторяемости взаимного положения Луны и Солнца относительно Земли. Из-за близкого расстояния до Земли приливная сила Луны в  $\approx 1,5$  раза больше приливной силы Солнца. Максимумы и минимумы приливных колебаний соответствуют самым высоким сизигийным (Луна и Солнце расположены на одной линии) и самым низким квадратурным (Луна и Солнце находятся под углом  $90^\circ$  относительно Земли) приливам.

Очевидно, что в разные годы величина приливной силы в одни и те же сутки существенно различается, следовательно необходимо выбрать систему отсчета, где начало года определяется по лунному календарю, а оценки коэффициентов корреляции значений аномалий среднесуточной температуры воздуха рассчитываются с шагом трое суток по синодическим, а не календарным месяцам.

Следствием этого будет смещение даты наступления нового года относительно дня зимнего солнцестояния. Началом лунно-солнечного (далее – лунного) года будет первое новолуние как момент максимального значения приливной силы, наступившее в период с 6 декабря по 5 января (21 декабря  $\pm$  15 суток). Кроме того, временные интервалы календарных сезонов тоже из года в год меняются (табл. 1).

Схематично лунный год представлен на рис. 1. Его длительность при таком делении составит 12 синодических месяцев или 354 дня. Остаток от разницы с календарным годом со

временем будет накапливаться, что обуславливает наличие «високосных» годов с тринадцатью месяцами. Сдвиги по синодическим месяцам между концом одного года и началом следующего, во избежание «разрывов» между годами, недопустимы, значит необходимым будет увеличить продолжительность одного из календарных сезонов внутри года с трех до четырех синодических месяцев.

Таблица 1

## Периоды начала календарных сезонов

№ сезона	Средняя дата наступления сезонов по календарному исчислению	Допустимый период начала сезонов по лунному календарю
1	21 декабря	6 декабря – 5 января
2	23 марта	8 марта – 7 апреля
3	22 июня	7 июня – 7 июля
4	23 сентября	8 сентября – 8 октября



Рис. 1. Временные сдвиги в лунном году

Оценки коэффициентов корреляции значений аномалий среднесуточной температуры воздуха между 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 и 30-ми сутками каждого синодического месяца рассчитывались по классической формуле

$$\tilde{r}_{\hat{T}_{ai}\hat{T}_{aj}} = \frac{\overline{\hat{T}_{ai}\hat{T}_{aj}} - \overline{\hat{T}_{ai}}\overline{\hat{T}_{aj}}}{\tilde{\sigma}_{\hat{T}_{ai}}\tilde{\sigma}_{\hat{T}_{aj}}}, \quad (1)$$

где  $i, j$  – порядковый номер суток;  
 $\hat{T}_{ai}, \hat{T}_{aj}$  – значения аномалий среднесуточной температуры воздуха (черта сверху означает осреднение значений по выборке);  
 $\tilde{\sigma}_{\hat{T}_{ai}}, \tilde{\sigma}_{\hat{T}_{aj}}$  – средние квадратические отклонения значений аномалий среднесуточной температуры воздуха.

Результаты расчетов коэффициентов корреляции для каждого месяца оформлялись в виде корреляционной матрицы. Опыты показали наличие более тесных взаимосвязей (большие значения коэффициентов корреляции) в новой системе отсчета в сравнении с календарным годом. Для примера на рис. 2 представлены корреляционные матрицы для 3-го и 4-го месяцев на станции 21432 «Островное».

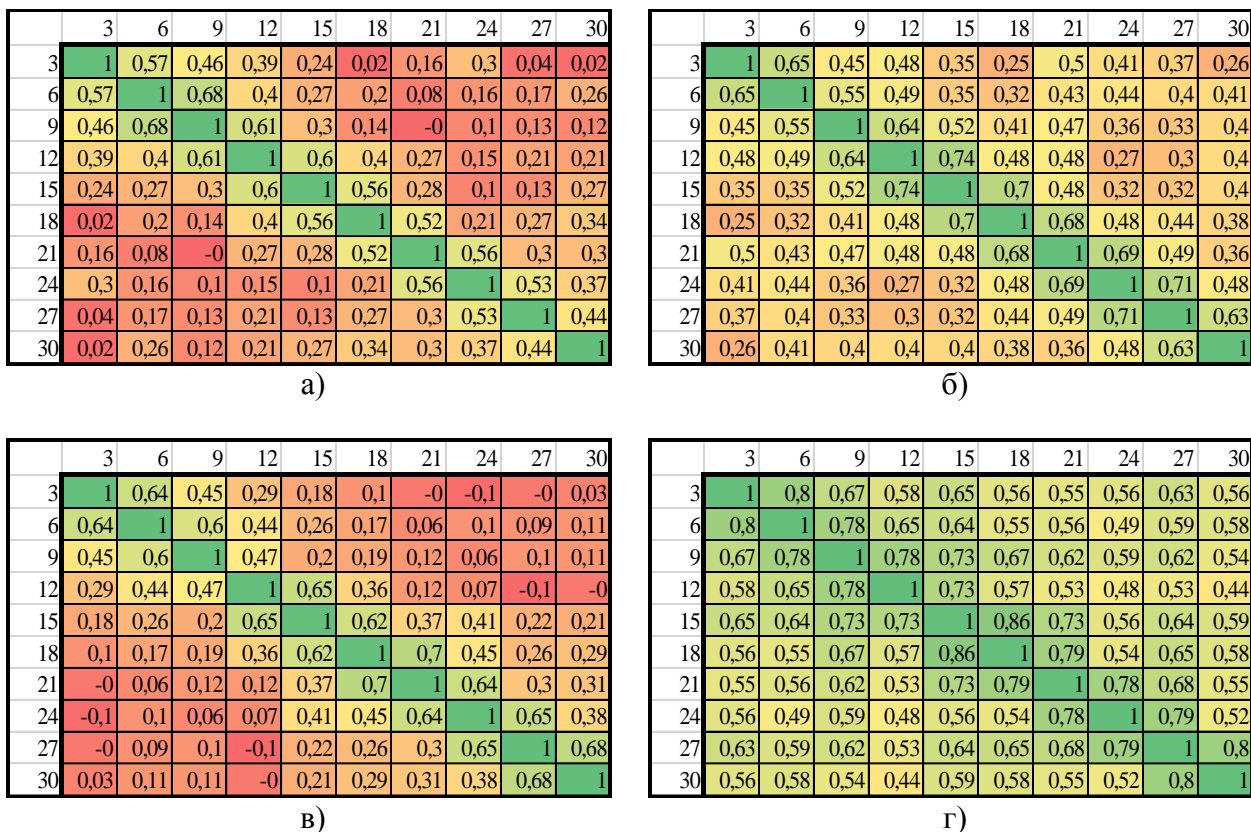


Рис. 2. Разница коэффициентов корреляции в 3-м (а, б) и 4-м (в, г) месяцах между календарными (а, в) и лунными (б, г) годами, ст. Островное

Очевидно, что границы ЕКС, определенные по лунному году, не будут совпадать с границами, определенными по календарному году. Иллюстрация этого явления представлена на рис. 3, где с помощью диаграммы Ганта изображены границы ЕКС, определенные разными способами. Цветами условно обозначены различные времена года (синим – зима, желтым – весна, зеленым – лето, оранжевым – осень). Ниже добавлен график изменения осредненных за период с 1953 по 2013 год значений среднесуточной температуры воздуха.

Как показано на рис. 2, значения коэффициентов корреляции между временными рядами, построенными по лунному году, в сравнении с календарным, больше по величине, а значит связи между соседними рядами данных выражены сильнее. Если расположить коэффициенты корреляции в ряд за все 12 месяцев, будет заметен квазипериодический характер коррелограмм (рис. 4). Ряды положительных значений коэффициентов корреляции, близких к единице, длина которых превышает на шкале времени длину месяца (рис. 2,г), говорят о наличии линейного тренда, свойственного сезону.

Коррелограммы, построенные по лунному году, не привязаны к традиционному календарному исчислению. Например, в 1953 году началу второго ЕКС соответствует дата 16 января, а в 1954 – 3 февраля, поэтому даты смен ЕКС тоже имеют сдвиги относительно начала каждого года.



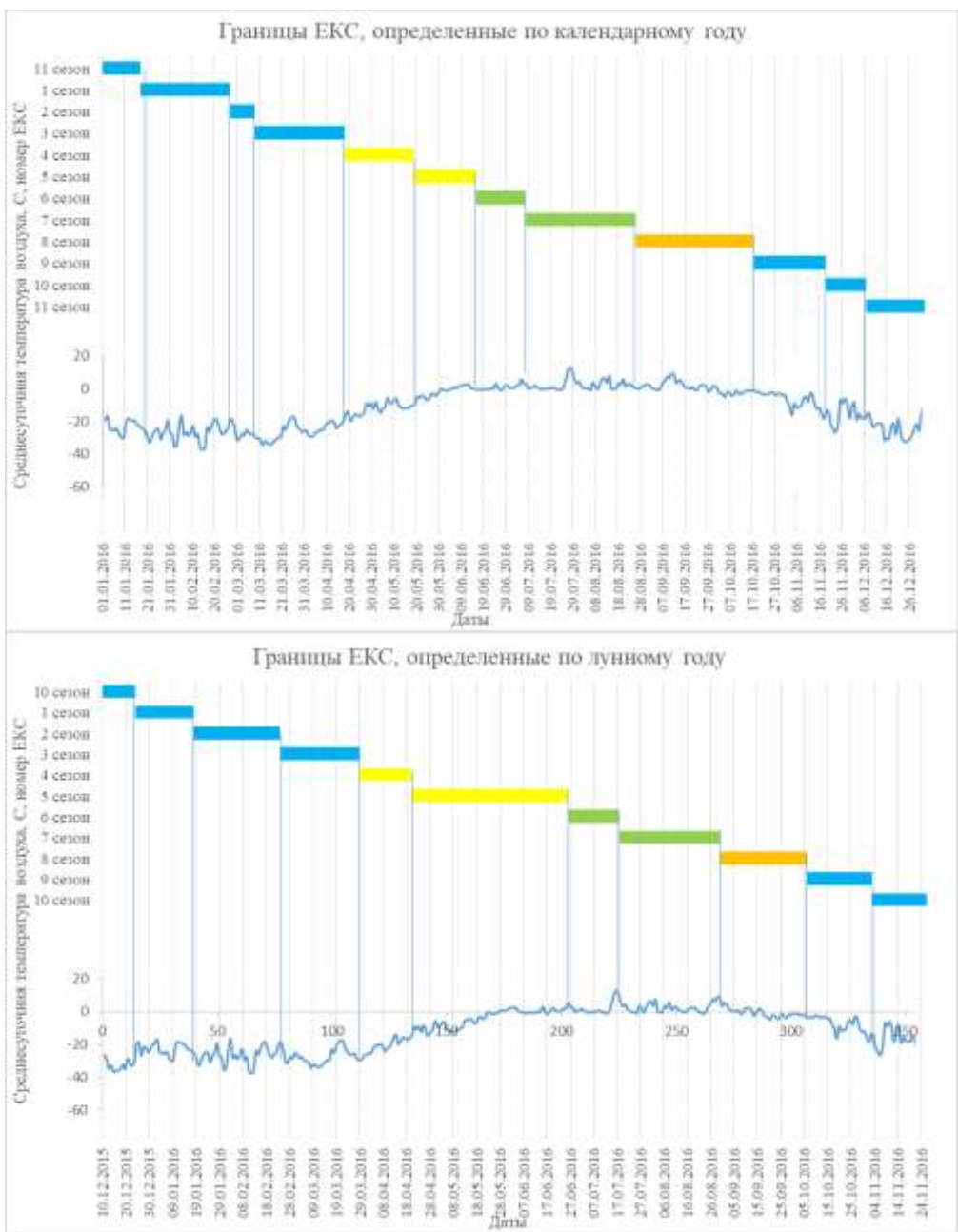


Рис. 3. Различия в границах ЕКС и их количестве при использовании разных систем отсчета, ст. Островное

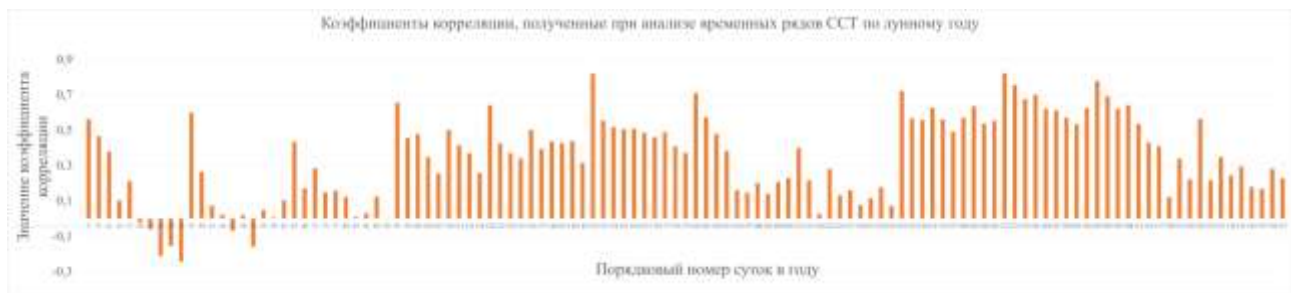


Рис. 4. Коррелограмма, построенная при анализе временных рядов среднесуточной температуры воздуха по лунному году, ст. Островное

По результатам численных экспериментов был обнаружен эффект, заключающийся в том, что рассчитанные границы ЕКС можно использовать, как накладывающийся на временной ряд любого календарного года шаблон, для которого началом отсчета служит начало года по лунному календарю. Иллюстрация шаблона классификации ЕКС на примере разных календарных лет представлена на рис. 5.

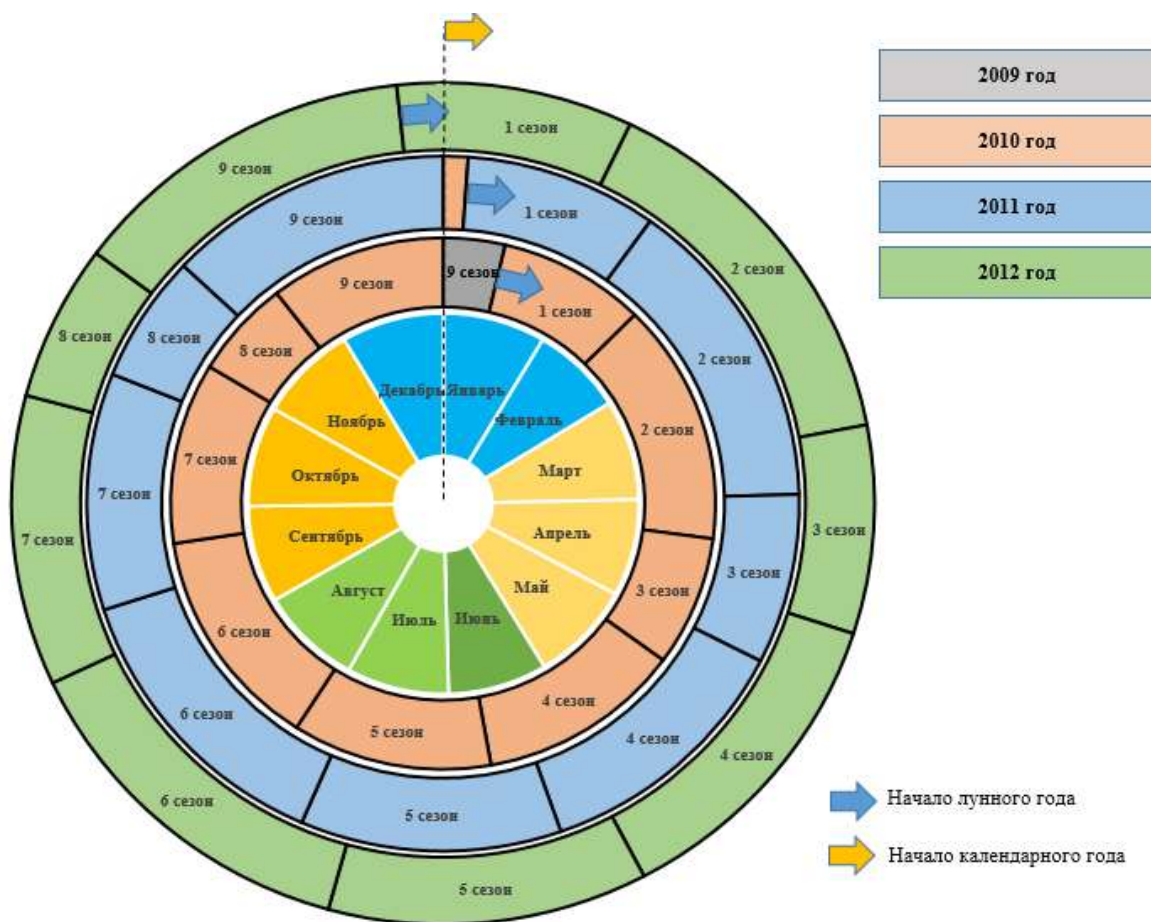


Рис. 5. Шаблон классификации ЕКС на примере разных календарных лет

## ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЕЗОНОВ

Отметим, что распределение солнечной радиации по Земному шару в верхних слоях атмосферы и изменение ее во времени определяются только астрономическими факторами, к которым относятся:

- вращение Земли вокруг Солнца;
- изменение расстояния от Земли до центра Солнца, связанное с ее движением по эллиптической орбите [4, 11].
- изменение солнечной активности [12–14].

Первые два фактора активно влияют на формирование календарных сезонов.

Третий фактор в большей степени отвечает за формирование климата на поверхности Земли и, как следствие, за формирование ЕКС. Изменение солнечной активности носит циклический характер. Период этого цикла составляет, в среднем, от 9 до 14 лет. Изучению воздействия солнечной активности на процессы общей циркуляции атмосферы и формированию аномалий метеорологических параметров посвящены многочисленные научные труды. Об-

зоры результатов исследований отражены в монографиях А. А. Гирса (1960), А. Л. Каца (1960), М. С. Эйгенсона (1963), Б. М. Рубашова (1964), Б. И. Сазонова (1964, 1991), Т. В. Покровской (1969), Г. Н. Чичасова (1991) и др. Например, снижение солнечной активности связывают с появлением суровых зим в различных областях, а высокий ее уровень – с повторяемостью меридиональной циркуляции атмосферы.

Для демонстрации универсальности и пригодности практического применения шаблона классификации ЕКС (см. рис. 3) приведем результаты численных экспериментов для районов трех различных (в климатическом отношении) станций:

– ст. 22140 «Святой Нос» (Побережье Белого моря, граница между областями субарктического и умеренно-континентального климата, 68°09' с. ш., 39°46' в. д.);

– ст. 22802 «Сортавала» (Побережье Ладожского озера, область умеренно континентального климата, 61°43' с. ш., 30°43' в. д.);

– ст. 23022 «Амдерма» (Побережье Карского моря, область субарктического климата, 69°46' с. ш., 61°41' в. д.).

При проведении исследований использовалась выборка данных наблюдений на этих станциях с 1948 по 1989 год, сгруппированная следующим образом: 33 года для статистического оценивания среднесуточной температуры воздуха; 22 года для статистического оценивания показателей снежного покрова.

На основе корреляционного метода с применением разработанного шаблона (см. рис. 5) были определены границы ЕКС исследуемых станций. Для оценивания их качественных показателей каждый ЕКС был отнесен к одному из периодов года: теплому или холодному (табл. 2).

Таблица 2

### Характеристики ЕКС в районах исследуемых станций

ст. 22140 «Святой Нос»				ст. 23022 «Амдерма»				ст. 22802 «Сортавала»			
№ ЕКС	$\overline{T_{cc}}$ , °C	Период года	Номер суток	№ ЕКС	$\overline{T_{cc}}$ , °C	Период года	Номер суток	№ ЕКС	$\overline{T_{cc}}$ , °C	Период года	Номер суток
1	-7,8	Холодный	17–43	1	-17,7	Холодный	14–43	1	-10,7	Холодный	14–40
2	-8,2	Холодный	44–91	2	-20,9	Холодный	44–76	2	-9,3	Холодный	41–82
3	-3	Холодный	92–130	3	-15,9	Холодный	77–109	3	-1,7	Холодный	83–103
4	+2,1	Теплый	131–166	4	-6,1	Холодный	110–163	4	+2	Теплый	104–130
5	+7,4	Теплый	167–196	5	+3,5	Теплый	164–199	5	+8,6	Теплый	131–157
6	+9,8	Теплый	197–220	6	+7,5	Теплый	200–217	6	+13,4	Теплый	158–184
7	+8,9	Теплый	221–256	7	+6,5	Теплый	218–247	7	+16,2	Теплый	185–217
8	+5	Теплый	257–283	8	+1,6	Теплый	248–289	8	+13,7	Теплый	218–256
9	+0,1	Теплый	284–325	9	-7,8	Теплый	290–334	9	+7,7	Теплый	257–283
10	-4,6	Холодный	326–16	10	-14,7	Холодный	335–13	10	+3	Теплый	284–310
								11	-1,7	Холодный	311–334
								12	-7,5	Холодный	335–13

Для каждого ЕКС назначаются показатели, подлежащие оцениванию, и их условный номер (табл. 3):

1 – первый в году переход температуры воздуха через 0°C к области отрицательных значений (номер сезона по порядку);

2 – первый в году переход температуры воздуха через 0°C к области положительных значений (номер сезона по порядку);

3 – становление сплошного снежного покрова на поверхности земли (первый в году сезон со сплошным снежным покровом);

4 – частота (вероятность) попадания значений среднесуточной температуры воздуха в их доверительный интервал для данного сезона (при доверительной вероятности не ниже 0,7);

5 – завершение процесса снеготаяния (первый в году сезон без снежного покрова).

Таблица 3

## Состав качественных показателей, подлежащих оцениванию на исследуемых станциях

ст. 22140 «Святой Нос»		ст. 23022 «Амдерма»		ст. 22802 «Сортавала»	
№ ЕКС	Соответствующие показатели	№ ЕКС	Соответствующие показатели	№ ЕКС	Соответствующие показатели
1	4	1	4	1	4
2	4, 5	2	4	2	4
3	4	3	4	3	4
4	2, 4	4	4	4	2, 4, 5
5	4	5	2, 4, 5	5	4
6	4	6	4	6	4
7	4	7	4	7	4
8	4	8	1, 4	8	4
9	1, 3, 4	9	4, 3	9	4
10	4	10	4	10	4
				11	1, 4, 3
				12	4

Расчет качественных показателей ЕКС проводился по следующим правилам.

Для каждого года, входящего в выборку значений, определялась дата наблюдения показателя.

Датой перехода температуры воздуха через 0°C к области отрицательных значений считались даты устойчивого ее перехода, т. е. в течение пяти суток подряд должны наблюдаться отрицательные значения среднесуточной температуры. Если после этого периода наблюдалось потепление, а сумма положительных значений среднесуточной температуры превысила сумму отрицательных, то переход через 0 не фиксировался. Аналогичным образом определялся переход температуры к области положительных значений.

Датой становления сплошного снежного покрова считался первый день сезона, в который степень покрытия окрестности станции снегом по шкале от 1 до 10 достигала значения 10, а после этого стаивание снежного покрова не наблюдалось.

Датой завершения процесса снеготаяния считался день схода снежного покрова. При этом не учитывались единичные случаи выпадения снега в даты, последующие за датой завершения снеготаяния.

Для каждых суток в лунном году рассчитывалась доверительная вероятность, с помощью которой характеризовалась достоверность измерения.

Оценивание всех показателей проводилось путем подсчета частоты попадания их значений в заданные граничные условия для каждого ЕКС:

$$P_n = \frac{N_n^{\text{совп}}}{N_n},$$

где  $n$  – номер показателя;

$N_n^{\text{совп}}$  – количество случаев попадания значений показателя в граничные условия;

$N_n$  – общее число случаев.

Результаты оценивания качественных показателей ЕКС для исследуемых районов станций представлены в табл. 4–6.

Точность и достоверность разработанного подхода оценивалась по контрольной выборке данных, которая была сформирована с 1990 по 2013 год для показателей 1–3 и 5, и с 1979 по 2013 год для 4-го показателя.

Таблица 4

**Оценки качественных показателей ЕКС в районе ст. 22140 «Святой Нос»**

Номер показателя	Номера ЕКС									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1								0,04	0,88	0,08
2			0,38	0,63						
3								0,04	0,92	0,04
4	0,55	0,83	0,67	0,42	0,6	0,79	0,83	0,67	0,74	0,84
5			0,17	0,75	0,08					

Таблица 5

**Оценки качественных показателей ЕКС в районе ст. 23022 «Амдерма»**

Номер показателя	Номера ЕКС									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1								0,67	0,33	
2				0,33	0,67					
3								0,33	0,67	
4	1	0,6	0,82	0,83	0,61	1	1	0,57	0,95	0,94
5				0,12	0,88					

Таблица 6

**Оценки качественных показателей ЕКС в районе ст. 22802 «Сортавала»**

Номер показателя	Номера ЕКС											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1										0,21	0,67	0,08
2		0,04	0,29	0,67								
3										0,13	0,79	0,08
4	0,78	0,79	0,71	0,7	0,74	0,85	0,79	1	0,67	0,74	0,96	0,91
5			0,04	0,88	0,08							

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Наилучших результатов достигает применение шаблона классификации ЕКС в областях, расположенных в зонах полярного, холодного континентального и умеренного климатов. Это объясняется тем, что долгопериодные приливы имеют наибольшую амплитуду на экваторе и на широтах  $\sim 60^\circ$ .

Оценки качественных показателей ЕКС можно интерпретировать как вероятность наблюдения соответствующего погодного явления в течение сезона для показателей 1–3 и 5, или как вероятность того, что среднее значение среднесуточной температуры воздуха за определенный день в текущем цикле (нескольких циклах) солнечной активности будет равно среднему ее значению из предыдущего цикла (нескольких циклов) (табл. 7, рис. 6).

Высокие оценки (близкие к 1) качественных показателей ЕКС, полученные в наиболее холодное время года, подтвердили значительную роль второстепенных астрономических факторов в формировании термического режима. Еще больше эта роль увеличивается при отсутствии прямого солнечного излучения, во время полярной ночи. Оценки, полученные при оценивании показателей «переходных» ЕКС, где интенсивность потепления или похолодания максимальна, гораздо ниже. Это объясняется увеличением роли мелкомасштабных атмосферных процессов при росте температуры воздуха.

Таблица 7

## Оценки показателей 1–3 и 5 на станциях

Номер показателя	Номера суток, для которых получены оценки показателей и вероятность их наблюдения		
	ст. 22140 «Святой Нос»	ст. 23022 «Амдерма»	ст. 22802 «Сортавала»
1	284–325, 88%	248–289, 67%	311–334, 67%
2	131–166, 63%	164–199, 67%	104–130, 67%
3	284–325, 92%	290–334, 67%	311–334, 79%
5	131–166, 75%	164–199, 88%	104–130, 88%

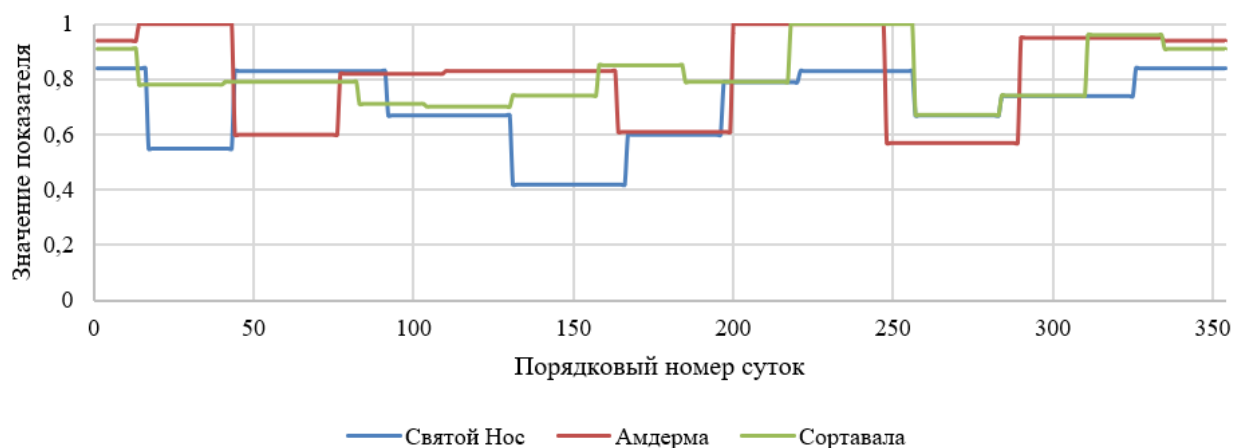


Рис. 6. Изменение оценок качественного показателя 4 на станциях в течение года

Несмотря на удовлетворительные результаты проведенных исследований по оцениванию качественных показателей естественных климатических сезонов года, классификация которых была проведена с учетом влияния астрономических факторов, для возможности их практического применения требуется проведение дальнейших исследований по следующим направлениям:

– разработка способа определения внутри каждого ЕКС фаз устойчивости, в которых состояние подстилающей поверхности исследуемого участка местности и приземного слоя атмосферы имеют характеристики, в наибольшей степени им присущие в данный временной период;

– уточнение системы отсчета, используемой для определения границ ЕКС, на основе учета циклов солнечной активности и их количественных характеристик (например, чисел Вольфа) [15].

## Список используемых источников

1. Алёхин С. Г., Чернышев С. В., Иванов Р. Д. Классификация ЕКС года на основе анализа временных рядов среднесуточной температуры воздуха // Сборник тезисов всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития РФ». – СПб. : РГГМУ, 2019. – С. 46–48.

2. Алёхин С. Г., Шемелов В. А., Иванов Р. Д. Количественные характеристики естественных климатических сезонов отдельных районов Арктического региона // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 70–75.

3. Алёхин С. Г., Иванов Р. Д. Определение границ климатических сезонов года на основе метода разложения полей среднесуточной температуры воздуха по естественным ортогональным функциям // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 674. – С. 80–86.
4. Коваленко В. Д. Гелиоцентрическая теория изменчивости климата и космическое будущее планеты Земля // Труды Западно-Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. – 1990. – № 93. – С. 33–58.
5. Никишин А. П. О статистической связи некоторых метеорологических явлений с фазой Луны // Труды Западно-Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. – 1990. – № 93. – С. 92–101.
6. Дроздов О. А. Основы климатологической обработки метеорологических наблюдений. – Л. : Изд-во Ленинградского ун-та, 1956. – 301 с.
7. Жигайло Т. С., Сидоренков Н. С. Астрономические причины аномально жарких сезонов // Физические проблемы экологии (экологическая физика). – 2011. – № 17. – С. 392–407.
8. Шерстюков Б. Г., Переведенцев Ю. П., Шерстюков А. Б. О связи многолетних колебаний температуры воздуха в Приволжском федеральном округе с циклическими космическими воздействиями на Землю // Вестник Удмуртского университета. – 2020. – № 30. – С. 307–315.
9. Сидоренков Н. С., Сумерова К. А. Геодинамические причины декадных изменений климата // Труды ГНИЦ РФ. – 2012. – Вып. 348. – С. 195–214.
10. Цыбульский В. В. Календари и хронология стран мира. – М. : Просвещение, 1982. – 128 с.
11. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. – Л. : Лениздат, 1984. – 376 с.
12. Завалишин Н. Н., Виноградова Г. М. О связи аномалий месячных температур воздуха с циклом Хейла и динамикой расстояния Земля – Солнце // Труды Западно-Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. – 1990. – № 93. – С. 25–32.
13. Тартаковский В. В., Чередыко Н. Н. Влияние солнечной активности на приземную температуру Северного полушария // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – № 12. – С. 1059–1064.
14. Калнин М. А., Андреева Н. В. Солнечная активность и ее влияние на погоду и климат // Материалы VII международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». – URL : <https://scienceforum.ru/216/article/2016026018> (дата обращения: 28.04.2024).
15. Дегтярев В. И., Попов Г. В., Чудненко С. Э. Параметры солнечного ветра и его геоэффективность в минимумах четырех солнечных циклов // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2021. – № 1. – С. 508–514.

В. Ю. Андриевская,  
*кандидат физико-математических наук, доцент;*  
А. В. Астапович,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Д. О. Медяников,  
*кандидат технических наук*

## **АЛГОРИТМ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВОЙ И НАЗЕМНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ**

В статье с позиций метода наименьших квадратов обоснован алгоритм совместного уравнивания спутниковых и традиционных геодезических измерений в пространственной прямоугольной системе координат. Получены математические выражения для вычисления оптимальных поправок к приближенным значениям параметров и оценки точности результатов уравнивания. Приведена последовательность уравнительных вычислений и дано описание экспериментальной проверки алгоритма.

Ключевые слова: метрологическая аттестация, совместное уравнивание, спутниковые геодезические определения, традиционные наземные измерения, эталонная геодезическая сеть.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Эталонные геодезические сети по своей сути являются средствами измерений, которые согласно Федеральному закону «Об обеспечении единства измерений» (в ред. Федеральных законов № 242-ФЗ от 18.07.2011, № 347-ФЗ от 30.11.2011, № 133-ФЗ от 28.07.2012) должны проходить метрологическую аттестацию на основе прецизионных геодезических измерений. При этом элементы геодезических построений могут измеряться как классическими методами наземной геодезии, так и методами спутниковой геодезии.

Наиболее эффективным методом метрологической аттестации эталонной геодезической сети является метод, в котором осуществляется сочетание спутниковых определений с измерениями длин сторон светодальномерами. Поскольку длины линий инвариантны и не зависят от системы координат, то существенно упрощается процедура совместной обработки результатов измерений в пространственной прямоугольной системе координат. В этой связи совершенствование алгоритмов совместной обработкой результатов измерений при комплексном использовании спутниковой аппаратуры и традиционных геодезических средств измерений представляется актуальной задачей.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВМЕСТНОГО УРАВНИВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ И ТРАДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Задачу совместного уравнивания спутниковых определений и традиционных измерений элементов эталонных геодезических сетей сформулируем следующим образом.

Пусть параметры эталонной геодезической сети определяются в два этапа. На первом этапе выполняются относительные спутниковые наблюдения с уравниванием и оценкой точности полученных координат пунктов сети. На втором этапе выполняются измерения длин сторон сети прецизионными светодальномерами. Будем полагать, что результаты измерений светодальномерами подвержены центрированным стохастическим ошибкам, характеризующимся ковариационной матрицей  $K_{\Delta}$ . Если в результатах измерений присутствуют систематические ошибки, то в параметрическую модель уравниваемых величин вводятся дополнительные параметры для учета систематического влияния.



Требуется по наземным измерениям уточнить выполненную сеть на первом этапе и оценить параметры систематических ошибок при их наличии.

Рассмотрим числовой вектор  $\mathbf{x}$ , который включает результаты измерений длин сторон сети. Выделим в математической модели погрешностей измерений длин сторон геодезической сети две группы параметров. В первую группу  $\mathbf{T}$  объединим параметры систематических ошибок. Во вторую группу  $\mathbf{U}$  включим параметры геодезической сети.

Для уравнивания результатов измерений длин сторон в качестве приближенных примем предварительные значения  $\mathbf{t}_0$  параметров систематических ошибок и значения  $\mathbf{u}$  параметров сети, полученные в результате уравнивания измерений на первом этапе, погрешности которых оцениваются элементами диагональных блоков ковариационной матрицы  $K_\lambda$ .

Тогда параметрическая модель ошибок уравниваемых длин сторон сети может быть представлена в общем случае в виде линейного уравнения в матричной форме:

$$\mathbf{z} = \mathbf{\Delta} + B\boldsymbol{\tau} + C\boldsymbol{\lambda}. \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{z}$  – вектор невязок параметрической модели уравниваемых длин сторон,

$$\mathbf{z} = \mathbf{x} - \Phi(\mathbf{t}_0, \mathbf{u}),$$

где  $\Phi(\mathbf{t}_0, \mathbf{u})$  – приближенная математическая модель измеренных длин сторон геодезической сети;

$\mathbf{\Delta}$  – составная часть вектора  $\mathbf{z}$ , обусловленная влиянием случайных погрешностей измерений;

$B\boldsymbol{\tau}$  – составная часть вектора  $\mathbf{z}$ , обусловленная влиянием систематических ошибок измерений длин сторон сети;

$C\boldsymbol{\lambda}$  – составная часть вектора  $\mathbf{z}$ , обусловленная влиянием ошибок сети, созданной на первом этапе спутниковыми методами;

$\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}$  – поправки к приближенным значениям параметров  $\mathbf{t}_0, \mathbf{u}$  соответственно.

Рассмотрим задачу решения уравнения (1) относительно  $\mathbf{\Delta}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}$ . Обозначим

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Delta} \\ \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix}, \quad R = [E \quad B \quad C].$$

Тогда, искомые величины  $\mathbf{\Delta}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}$  должны быть получены из решения уравнения

$$R\mathbf{v} = \mathbf{z}. \quad (2)$$

Решение формально можно записать в виде

$$\mathbf{v} = R^{-}\mathbf{z}, \quad (3)$$

но оно заведомо не единственное. В решении (3)  $R^{-}$  означает обобщенное обращение прямоугольной матрицы  $R$ .

Стандартным методом решения уравнения (2) является метод наименьших квадратов, который состоит в минимизации квадратичной нормы вектора  $\mathbf{v}$ :

$$\|\mathbf{v}\|^2 = \min.$$

Полагается, что составляющие вектора  $\mathbf{v}$  являются независимыми друг от друга величинами. В этом случае квадратичная норма вектора  $\mathbf{v}$  будет равна

$$\|\mathbf{v}\|^2 = \|\mathbf{\Delta}\|^2 + \|\boldsymbol{\tau}\|^2 + \|\boldsymbol{\lambda}\|^2. \quad (4)$$

Квадратичные нормы векторов  $\mathbf{\Delta}, \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\lambda}$  в евклидовом пространстве можно записать в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned}\|\Delta\|^2 &= \Delta^T P_\Delta \Delta; \\ \|\tau\|^2 &= \tau^T P_\tau \tau; \\ \|\lambda\|^2 &= \lambda^T P_\lambda \lambda.\end{aligned}\quad (5)$$

Весовые матрицы  $P_\Delta, P_\tau, P_\lambda$  дают ограничения на вариации векторов  $\Delta, \tau, \lambda$ . В качестве таких матриц естественно взять обратные ковариационные матрицы. Следовательно,

$$\begin{aligned}\|\Delta\|^2 &= \Delta^T K_\Delta^{-1} \Delta; \\ \|\tau\|^2 &= \tau^T K_\tau^{-1} \tau; \\ \|\lambda\|^2 &= \lambda^T K_\lambda^{-1} \lambda.\end{aligned}\quad (6)$$

Если дисперсии случайных величин  $\Delta, \tau, \lambda$  малы, то эти величины могут варьироваться только в узких пределах. Для больших дисперсий возможны большие вариации. Если часть векторов допускается без ограничений, то элементы этих векторов имеют бесконечную дисперсию или нулевой вес.

При решении уравнения (1) будем полагать, что вектор  $\tau$  не имеет ограничений на вариации, т. е. имеет бесконечную дисперсию и поэтому принимается неслучайным вектором. Векторы  $\Delta$  и  $\lambda$  будем считать случайными векторами, для которых ковариационные матрицы известны.

Тогда уравнение (1) можно представить в виде

$$z = B\tau + \Delta + C\lambda \Rightarrow z = B\tau + \theta. \quad (7)$$

Данное уравнение решим методом Лагранжа под условием минимума нормы (4), которая с учетом (6) и (7) принимает вид

$$\theta^T K_\theta^{-1} \theta = \Delta^T K_\Delta^{-1} \Delta + \lambda^T K_\lambda^{-1} \lambda = \min. \quad (8)$$

Составим функцию Лагранжа

$$\Phi_L = \Delta^T K_\Delta^{-1} \Delta + \lambda^T K_\lambda^{-1} \lambda - 2k^T (B\tau + \Delta + C\lambda - z), \quad (9)$$

продифференцируем её по переменным  $\Delta, \lambda, k, \tau$  и частные производные приравняем нулю.

После несложных преобразований получим решение уравнения (1) в виде

$$\begin{aligned}\hat{\Delta} &= K_\Delta K_z^{-1} P_B z = S z; \\ \hat{\tau} &= (B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T K_z^{-1} z = G z; \\ \hat{\lambda} &= K_\lambda C^T K_z^{-1} P_B z = K_{\lambda z} K_z^{-1} P_B z = H z.\end{aligned}\quad (10)$$

Здесь

$$\begin{aligned}K_z &= K_\theta = K_\Delta + C K_\lambda C^T; \\ P_B &= E - B(B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T K_z^{-1} = E - U_B,\end{aligned}\quad (11)$$

где  $E$  – единичная матрица.

Заметим, что матрица  $P_B$  является идемпотентной матрицей. Она исключает систематическую часть  $B\tau$  в векторе данных  $z$ , т. е. центрирует его.

Получим выражение для оценки вектора  $\theta$

$$\begin{aligned}\hat{\theta} &\Rightarrow (\hat{\Delta} + C\hat{\lambda}) = (K_\Delta K_z^{-1} P_B z + C K_\lambda C^T K_z^{-1} P_B z) = \\ &= (K_\Delta + C K_\lambda C^T) K_z^{-1} P_B z = K_z K_z^{-1} P_B z = P_B z.\end{aligned}$$

В результате уравнивания будем иметь

$$\begin{bmatrix} x' \\ t \\ \hat{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - \hat{\theta} \\ t_0 + \hat{t} \\ u + \hat{\lambda} \end{bmatrix}.$$

После математической обработки второго этапа ошибки уравненных значений измеренных величин  $\mathbf{x}'$  и ошибки уравненных параметров  $\mathbf{t}$  и  $\hat{\mathbf{u}}$ , а также ошибки оценок случайных погрешностей  $\hat{\Delta}$  измерений длин сторон сети будут равны:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{x'} \\ \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}_{\hat{u}} \\ \mathbf{e}_{\hat{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}' - \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{t} - \hat{\mathbf{t}} \\ \hat{\mathbf{u}} - \hat{\mathbf{u}} \\ \hat{\mathbf{x}} - M(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} - \hat{\Delta} - C\hat{\lambda} - \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{t}_0 + \hat{\mathbf{t}} - \hat{\mathbf{t}} \\ \mathbf{u} + \hat{\lambda} - \hat{\mathbf{u}} \\ \mathbf{x} - \hat{\Delta} - M(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}} \\ \hat{\mathbf{t}} - \boldsymbol{\tau} \\ \hat{\lambda} - \boldsymbol{\lambda} \\ \Delta - \hat{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{e}_{\hat{\theta}} \\ \mathbf{e}_{\hat{t}} \\ \mathbf{e}_{\hat{\lambda}} \\ -\mathbf{e}_{\hat{\Delta}} \end{bmatrix},$$

где  $\hat{\mathbf{x}}$ ,  $\hat{\mathbf{t}}$ ,  $\hat{\mathbf{u}}$  – истинные значения уравниваемых величин, параметров систематических ошибок измерений и параметров геодезической сети соответственно.

Для оценки точности получим выражения для векторов ошибок  $\mathbf{e}_{\hat{\theta}}$ ,  $\mathbf{e}_{\hat{t}}$ ,  $\mathbf{e}_{\hat{\lambda}}$  и  $\mathbf{e}_{\hat{\Delta}}$ .

Ошибками оценок  $\hat{\mathbf{t}}$ , согласно (10) и (7) будут

$$\mathbf{e}_{\hat{t}} = \hat{\mathbf{t}} - \boldsymbol{\tau} = G\mathbf{z} - \boldsymbol{\tau} = G(B\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\theta}) - \boldsymbol{\tau} = G\boldsymbol{\theta}, \quad (12)$$

так как

$$GB = (B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T K_z^{-1} B = E.$$

Аналогично получим выражения для ошибок векторов  $\hat{\lambda}$ ,  $\hat{\theta}$ ,  $\hat{\Delta}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{\hat{\lambda}} &= \hat{\lambda} - \boldsymbol{\lambda} = H\mathbf{z} - \boldsymbol{\lambda} = H(B\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\theta}) - \boldsymbol{\lambda} = H\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda}; \\ \mathbf{e}_{\hat{\theta}} &= \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta} = P_B \mathbf{z} - \boldsymbol{\theta} = P_B(B\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\theta}) - \boldsymbol{\theta} = P_B \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta} = -U_B \boldsymbol{\theta}; \\ \mathbf{e}_{\hat{\Delta}} &= \hat{\Delta} - \Delta = S\mathbf{z} - \Delta = S(B\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\theta}) - \Delta = S\boldsymbol{\theta} - \Delta, \end{aligned} \quad (13)$$

поскольку вследствие свойства  $P_B B = 0$ , справедливого для проекционной матрицы  $P_B$ , будем иметь

$$\begin{aligned} HB &= K_{\lambda z} K_z^{-1} P_B B = 0, \\ SB &= K_{\Delta} K_z^{-1} P_B B = 0. \end{aligned}$$

Точность вектора  $\mathbf{t}$  оценивается по ковариационной матрице

$$K_{\mathbf{t}} = M(\mathbf{e}_t \mathbf{e}_t^T) = M(\mathbf{e}_{\hat{t}} \mathbf{e}_{\hat{t}}^T) = GM(\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}^T)G^T = GK_z G^T = (B^T K_z^{-1} B)^{-1}. \quad (14)$$

Ковариационная матрица ошибок вектора  $\mathbf{x}'$  равна

$$\begin{aligned} K_{\mathbf{x}'} &= M(\mathbf{e}_{x'} \mathbf{e}_{x'}^T) = M(\mathbf{e}_{\hat{\theta}} \mathbf{e}_{\hat{\theta}}^T) = U_B M(\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\theta}^T) U_B^T = U_B K_z U_B^T = \\ &= B(B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T K_z^{-1} K_z K_z^{-1} B(B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T \Rightarrow \\ &\Rightarrow K_{\mathbf{x}'} = B(B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T. \end{aligned} \quad (15)$$

Формулу (15) можно представить в виде формулы

$$\begin{aligned} K_{\mathbf{x}'} &= B(B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T = K_z - K_z + B(B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T K_z^{-1} K_z \Rightarrow \\ &\Rightarrow K_{\mathbf{x}'} = K_z - P_B K_z, \end{aligned} \quad (16)$$

которая показывает, что точность уравненных значений измеренных величин выше точности измеренных значений. Матрицы  $K_z$  и  $P_B K_z$  являются симметричными положительно определенными матрицами. Следовательно, диагональные элементы матрицы  $K_{\mathbf{x}'}$  (квадраты средних квадратических ошибок уравненных величин) меньше диагональных элементов матрицы  $K_z$ .

По аналогии получим ковариационные матрицы для ошибок векторов  $\hat{\lambda}$ ,  $\hat{\Delta}$ :

$$\begin{aligned} K_{\hat{\lambda}} &= M(\mathbf{e}_{\hat{\lambda}} \mathbf{e}_{\hat{\lambda}}^T) = M\{(H\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda})(H\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda})^T\} = K_{\lambda} - HK_{z\lambda} = K_{\lambda} - K_{\lambda z} K_z^{-1} P_B K_{z\lambda}; \\ K_{\hat{\Delta}} &= M(\mathbf{e}_{\hat{\Delta}} \mathbf{e}_{\hat{\Delta}}^T) = M\{(S\boldsymbol{\theta} - \Delta)(S\boldsymbol{\theta} - \Delta)^T\} = K_{\Delta} - SK_{\Delta} = K_{\Delta} - K_{\Delta} K_z^{-1} P_B K_{\Delta} \end{aligned}$$

и матрицы взаимных ковариаций для ошибок векторов  $\hat{\Delta}$ ,  $\hat{\mathbf{t}}$  и  $\hat{\Delta}$ ,  $\hat{\lambda}$ :

$$\begin{aligned}
K_{\hat{\Delta}\hat{\tau}} &= M(\mathbf{e}_{\hat{\Delta}}\mathbf{e}_{\hat{\tau}}^T) = M\{(\mathbf{S}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\Delta})(\mathbf{G}\boldsymbol{\theta})^T\} = \mathbf{S}K_{\boldsymbol{\theta}}\mathbf{G}^T - K_{\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{\theta}}\mathbf{G}^T = \\
&= -K_{\boldsymbol{\Delta}}K_z^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{B}^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1}
\end{aligned} \tag{17}$$

поскольку  $\mathbf{S}K_{\boldsymbol{\theta}}\mathbf{G}^T = K_{\boldsymbol{\Delta}}K_z^{-1}P_B K_{\boldsymbol{\theta}}K_z^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{B}^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1} = \mathbf{O}$  – нулевая матрица и  $K_{\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{\theta}} = K_{\boldsymbol{\Delta}}$ .

Для векторов  $\hat{\boldsymbol{\Delta}}$  и  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  будем иметь

$$\begin{aligned}
K_{\hat{\Delta}\hat{\lambda}} &= M(\mathbf{e}_{\hat{\Delta}}\mathbf{e}_{\hat{\lambda}}^T) = M\{(\mathbf{S}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\Delta})(\mathbf{H}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda})^T\} = \\
&= \mathbf{S}K_{\boldsymbol{\theta}}\mathbf{H}^T - \mathbf{S}K_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\lambda}} - K_{\boldsymbol{\Delta}}\mathbf{H}^T + K_{\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{\lambda}} = -K_{\boldsymbol{\Delta}}K_z^{-1}P_B K_{z\boldsymbol{\lambda}},
\end{aligned} \tag{18}$$

потому что  $\mathbf{S}K_{\boldsymbol{\theta}}\mathbf{H}^T = \mathbf{S}K_{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\lambda}}$  и компоненты векторов  $\boldsymbol{\Delta}$  и  $\boldsymbol{\lambda}$ , согласно модели (1), взаимно независимые величины, для которых  $K_{\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{\lambda}}$  есть нулевая матрица.

Взаимные ковариации ошибок векторов  $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$  и  $\hat{\boldsymbol{\tau}}$  составляют матрицу  $K_{\hat{\lambda}\hat{\tau}}$ :

$$K_{\hat{\lambda}\hat{\tau}} = M(\mathbf{e}_{\hat{\lambda}}\mathbf{e}_{\hat{\tau}}^T) = M\{(\mathbf{H}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\lambda})(\mathbf{G}\boldsymbol{\theta})^T\} = \mathbf{H}K_{\boldsymbol{\theta}}\mathbf{G}^T - K_{\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\theta}}\mathbf{G}^T = -K_{\boldsymbol{\lambda}z}K_z^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{B}^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1},$$

так как

$$\mathbf{H}K_{\boldsymbol{\theta}}\mathbf{G}^T = K_{\boldsymbol{\lambda}z}K_z^{-1}P_B K_{\boldsymbol{\theta}}K_z^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{B}^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1} = K_{\boldsymbol{\lambda}z}K_z^{-1}P_B \mathbf{B}(\mathbf{B}^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1} = \mathbf{O}$$

есть нулевая матрица, а  $K_{\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\theta}} = K_{\boldsymbol{\lambda}z}$ .

Итак, для составного вектора оценок  $\hat{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\Delta}} \\ \hat{\boldsymbol{\tau}} \\ \hat{\boldsymbol{\lambda}} \end{bmatrix}$  имеем ковариационную матрицу ошибок

$$\begin{aligned}
K_{\hat{\mathbf{v}}} &= \begin{bmatrix} K_{\hat{\boldsymbol{\Delta}}} & K_{\hat{\boldsymbol{\Delta}}\hat{\boldsymbol{\tau}}} & K_{\hat{\boldsymbol{\Delta}}\hat{\boldsymbol{\lambda}}} \\ K_{\hat{\boldsymbol{\tau}}\hat{\boldsymbol{\Delta}}} & K_{\hat{\boldsymbol{\tau}}} & K_{\hat{\boldsymbol{\tau}}\hat{\boldsymbol{\lambda}}} \\ K_{\hat{\boldsymbol{\lambda}}\hat{\boldsymbol{\Delta}}} & K_{\hat{\boldsymbol{\lambda}}\hat{\boldsymbol{\tau}}} & K_{\hat{\boldsymbol{\lambda}}} \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} K_{\boldsymbol{\Delta}} - K_{\boldsymbol{\Delta}}K_z^{-1}P_B K_{\boldsymbol{\Delta}} & -K_{\boldsymbol{\Delta}}K_z^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{B}^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1} & -K_{\boldsymbol{\Delta}}K_z^{-1}P_B K_{z\boldsymbol{\lambda}} \\ -(B^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1}B^TK_z^{-1}K_{\boldsymbol{\Delta}} & (B^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1} & -(B^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1}B^TK_z^{-1}K_{z\boldsymbol{\lambda}} \\ K_{\boldsymbol{\lambda}z}K_z^{-1}P_B K_{\boldsymbol{\Delta}} & -K_{\boldsymbol{\lambda}z}K_z^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{B}^TK_z^{-1}\mathbf{B})^{-1} & K_{\boldsymbol{\lambda}} - K_{\boldsymbol{\lambda}z}K_z^{-1}P_B K_{z\boldsymbol{\lambda}} \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{19}$$

Адекватность оценки точности полученных результатов отражает апостериорная средняя квадратическая ошибка единицы веса [1]

$$\mu = \sqrt{\frac{\mathbf{z}^TK_z^{-1}P_B \mathbf{z}}{n - k}},$$

значение которой должно быть близким к единице, поскольку ковариационные матрицы до уравнивания не масштабировались.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОВМЕСТНОГО УРАВНИВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ЭТАЛОННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Математическая обработка при метрологической аттестации эталонных геодезических сетей, исполненных сочетанием спутниковых и наземных измерений, выполняется в два этапа.

**Первый этап.** Уравнивание спутниковых определений.

1. Сбор и систематизация измерительной информации по наблюдению сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на ближайших постоянно действующих

пунктах IGS (*International geodetic system*), пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и спутниковых дифференциальных геодезических станциях (СДГС) коммерческих структур.

Измерительная информация запрашивается на официальных сайтах собственников измерительной информации.

2. Постобработка и уравнивание измерительной информации с получением пространственных прямоугольных координат пунктов СДГС.

3. Постобработка и уравнивание спутниковых измерений на пунктах эталонной геодезической сети с оценкой точности результатов в виде отдельных диагональных блоков матрицы  $K_\lambda$ .

Для постобработки и уравнивания спутниковых геодезических сетей должны использоваться сертифицированные программные продукты.

Положение пунктов эталонной геодезической сети определяется относительно СДГС. В результате уравнивания спутниковых наблюдений получают приближенные значения  $u$  пространственных прямоугольных координат пунктов эталонной геодезической сети и ковариационную матрицу их ошибок  $K_\lambda$ .

**Второй этап.** Уравнивание длин сторон сети.

1. Составление параметрических уравнений ошибок уравниваемых длин сторон эталонной геодезической сети.

Уравнения ошибок составляются для всех измеренных наклонных расстояний между пунктами сети. Число параметров  $T$  принимается равным числу светодальномеров, используемых для измерений длин сторон сети. Приближенные значения параметров систематических ошибок принимаются равными нулю. В качестве параметров  $U$  принимаются пространственные прямоугольные координаты пунктов, приближенные значения которых получены в результате уравнивания пространственных векторов, измеренных спутниковыми геодезическими приемниками.

Модель длины стороны сети в геоцентрической прямоугольной системе координат имеет вид

$$S_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2},$$

которому соответствуют параметрические уравнения ошибок [3]:

$$z_{ij} = \Delta_{ij} + \tau_k + \left(\frac{X_j - X_i}{S_{ij}}\right)_0 \lambda_{X_j} - \left(\frac{X_j - X_i}{S_{ij}}\right)_0 \lambda_{X_i} + \left(\frac{Y_j - Y_i}{S_{ij}}\right)_0 \lambda_{Y_j} - \left(\frac{Y_j - Y_i}{S_{ij}}\right)_0 \lambda_{Y_i} + \\ + \left(\frac{Z_j - Z_i}{S_{ij}}\right)_0 \lambda_{Z_j} - \left(\frac{Z_j - Z_i}{S_{ij}}\right)_0 \lambda_{Z_i},$$

где  $\tau_k$  – поправка к приближенному значению параметра систематических ошибок измерений светодальномером с индексом  $k$ .

Коэффициенты при неизвестных параметрах систематических ошибок равны единице, коэффициенты при параметрах эталонной геодезической сети вычисляются по приближенным значениям пространственных прямоугольных координат пунктов сети. Из коэффициентов при неизвестных параметрах  $\tau$  и  $\lambda$  формируются матрицы  $B$  и  $C$ .

Невязка  $z_{ij}$  представляет собой разность между измеренным значением длины стороны светодальномером и вычисленным значением по приближенным координатам пунктов эталонной геодезической сети:

$$z_{ij} = (S_{ij})_{\text{изм.}} - (S_{ij})_{\text{выч.}}$$

2. Вычисление ковариационной матрицы:

$$K_z = K_\Delta + CK_\lambda C^T.$$

3. Вычисление проекционной матрицы:

$$P_B = E - B(B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T K_z^{-1}.$$

4. Вычисление оценок ошибок и оценок искомых параметров:

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= P_B z; \\ \hat{\Delta} &= K_\Delta K_z^{-1} P_B z; \\ \hat{t} &= (B^T K_z^{-1} B)^{-1} B^T K_z^{-1} z; \\ \hat{\lambda} &= K_\lambda C^T K_z^{-1} P_B z. \end{aligned}$$

5. Вычисление урвненных значений параметров эталонной геодезической сети:

$$\begin{bmatrix} x' \\ t \\ \hat{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - \hat{\theta} \\ t_0 + \hat{t} \\ u + \hat{\lambda} \end{bmatrix}.$$

6. Оценка точности урвненных значений длин сторон и параметров систематических ошибок и параметров сети:

$$\begin{aligned} K_{x'} &= K_z - P_B K_z; \\ K_t &= (B^T K_z^{-1} B)^{-1}; \\ K_{\hat{\lambda}} &= K_\lambda - K_{\lambda z} K_z^{-1} P_B K_{z\lambda}. \end{aligned}$$

## АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА

Для апробации алгоритма была использована спутниковая и наземная геодезическая информация, которая получена в 2023 году при выполнении метрологической аттестации эталонной геодезической сети на топогеодезическом полигоне «Лехтуси» Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского в п. Лехтуси Ленинградской области (рис. 1).

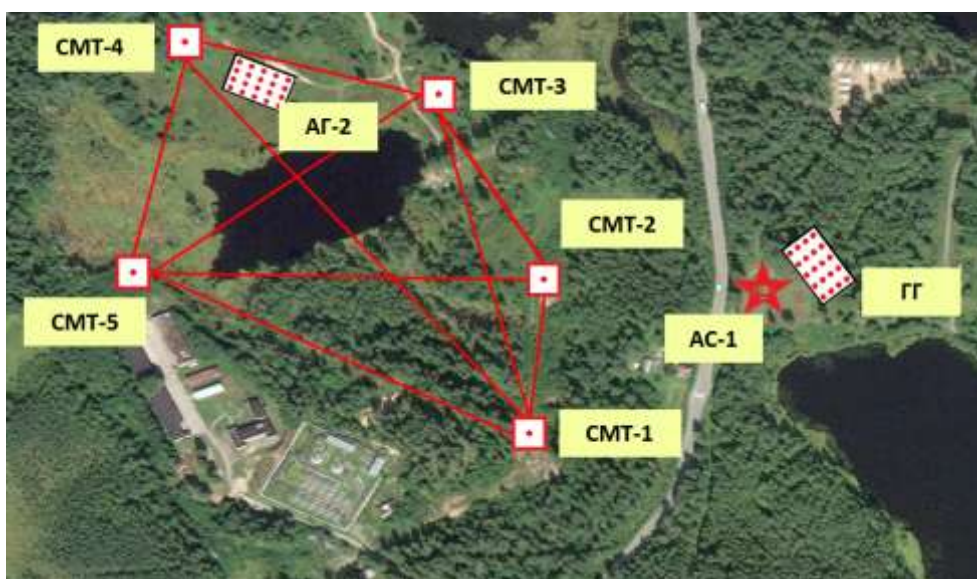


Рис. 1. Схема сети микротриангуляции «Звездочка» на топогеодезическом полигоне «Лехтуси»

На первом этапе было выполнено уравнивание синхронных спутниковых наблюдений сигналов ГНСС на пяти пунктах эталонной геодезической сети и четырех пунктах СДГС. В результате уравнивания получены приближенные координаты пунктов и ковариационные матрицы их ошибок.

На втором этапе математической обработки по рассмотренному выше алгоритму в геоцентрической пространственной прямоугольной системе координат выполнено уравнивание измеренных электронным тахеометром *Leica TCR-01* наклонных расстояний между пунктами сети.

Уравнивание длин сторон сети позволило уточнить пространственное положение пунктов эталонной геодезической сети и оценить постоянную поправку измерений длин линий электронным тахеометром. В результате уравнивания были получены следующие значения средних квадратических ошибок пространственных координат пунктов эталонной геодезической сети:

$$m_x = 2,3 \text{ мм}; m_y = 2,5 \text{ мм}; m_z = 4,5 \text{ мм}.$$

## ВЫВОД

Таким образом, совместная обработка спутниковой и наземной геодезической информации в пространственной системе координат по предложенному алгоритму позволяет не только осуществлять контроль правильности уравнивания спутниковой геодезической сети, но и повышать точность результатов уравнивания.

## Список используемых источников

1. *Астапович А. В.* Теория математической обработки геодезических измерений : учебник. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. *Ильин В. А., Позняк Э. Г.* Линейная алгебра. – М. : Наука, 1978. – 304 с.
3. *Машимов М. М.* Уравнивание геодезических сетей. – М. : Недра, 1979. – 367 с.

Д. М. Бирюков;  
А. П. Бондаренко;  
А. В. Новиков,  
*кандидат технических наук;*  
А. С. Тимошук,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
М. В. Ширококов

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ ЗА АПРЕЛЬ 2024 ГОДА

В статье представлены материалы исследования аномалий общего содержания озона в Арктическом регионе за апрель 2024 года и сопутствующих им синоптических процессов. В работе использовались данные отечественных и зарубежных средств дистанционного зондирования Земли метеорологической спутниковой группировки и архива сборно-кинематических карт барической топографии для исследования синоптических процессов, наблюдающихся совместно с аномалиями общего содержания озона. Приводятся выводы о связях аномальных уровней общего содержания озона в Арктическом регионе с наблюдаемыми синоптическими процессами.

Ключевые слова: синоптические процессы, общее содержание озона, метеорологические спутники, дистанционное зондирование, Арктический регион.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях обострения межгосударственных отношений, изменения климата, борьбы за ресурсы, вопросы обеспечения национальной безопасности Российской Федерации (РФ) являются приоритетными [1]. Одной из наиболее важных составляющих обеспечения национальной безопасности в условиях наблюдающихся глобальных изменений климата является компонента военной безопасности в Арктике, которая приобрела острую актуальность из-за пересечения в этом регионе геостратегических и экономических интересов целого ряда государств.

По оценкам экспертов в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) вылавливается порядка 15% добываемых в стране водных биологических ресурсов, в ее недрах залегают более четверти мировых неразведанных запасов полезных ископаемых. По акватории Арктической зоны проходит Северный морской путь, имеющий геостратегическое значение для российского флота и международного судоходства в целом.

Демаркационные претензии, наличие спорных участков акваторий Северного ледовитого океана приводят к столкновению интересов приарктических государств, обусловленных борьбой за права разработки недр, вылова биоресурсов, развития логистических коммуникаций в Арктике. Усугубляет проблему милитаризация региона со стороны соседних государств, что представляет прямую военную угрозу национальной безопасности нашей страны. Министерством обороны РФ для купирования возможных угроз в Арктической зоне на долговременной основе осуществляется комплекс мероприятий, направленный на усиление военной компоненты. Опыт последних вооруженных конфликтов и войн, а также военные учения с использованием авиации и кораблей Военно-морского флота, показали, что специфические гидрометеорологические и геофизические условия АЗРФ накладывают весомые ограничения на эффективность ведения боевых действий и боеспособность войск (сил) как в мирное, так и в военное время. Эти ограничения в Арктике обуславливаются комплексным воздействием природно-климатических факторов на военные объекты, условия жизнедеятельности личного состава, логистику.

Можно констатировать, что усиление группировки войск (сил) в сложных условиях климата АЗРФ обостряет вопрос реализации дополнительных мер по сохранению жизни и здо-



ровья людей, сбережению местных экологических систем с учетом гидрометеорологических особенностей региона. В частности, такой особенностью является состояние общего содержания озона (ОСО) в атмосфере, исследования которого важны для понимания взаимосвязей ОСО и трансформации синоптических процессов, изменения климата и состояния экосистем в АЗРФ.

## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

Для описания суммарного (интегрального) распределения озона в атмосфере применяются характеристики, представленные на рис. 1.

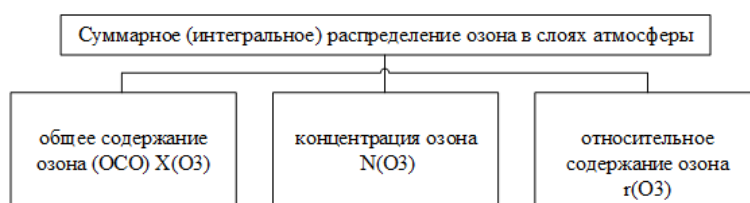


Рис. 1. Характеристики распределения озона в атмосфере

Под общим содержанием озона  $ОСО = X(O_3)$  [2] понимается толщина слоя озона в вертикальном столбе атмосферы (размерность  $[X(O_3)] = \text{см}$ ). Чаще ОСО дается в единицах Добсона: 1 е. Д. равна  $10^{-3}$  см. Для исследований аномалий содержания озона в атмосфере применяется информация, сформированная на основе ежедневных данных, полученных с помощью спутниковых методов и наземной озонметрической сети.

Глобальная наземная озонметрическая сеть в 1973 г. насчитывала порядка 140 измерительных станций, а современные ежедневные наблюдения за состоянием озонового слоя осуществляются регулярно уже на 300 наземных станциях в дискретных точках на пяти континентах и островах, в том числе в Арктике и Антарктиде. Далее информация об общем содержании озона поступает в Глобальную службу атмосферы Всемирной метеорологической организации. Ежедневные оперативные озонметрические данные поступают в Мировой центр данных наблюдений за озоном и УФ-радиацией (Канада). На примерно 50 озонметрических станциях измеряется вертикальное распределение ОСО с помощью электрохимических озонзондов, поднимаемых до высоты около 30 км. В Российской Федерации оперативные наблюдения состояния озонового слоя выполняются Росгидрометом на основе обработки и анализа серии карт, построенных за типовые временные интервалы (сутки и более). Виды картографической информации представлены на рис. 2.

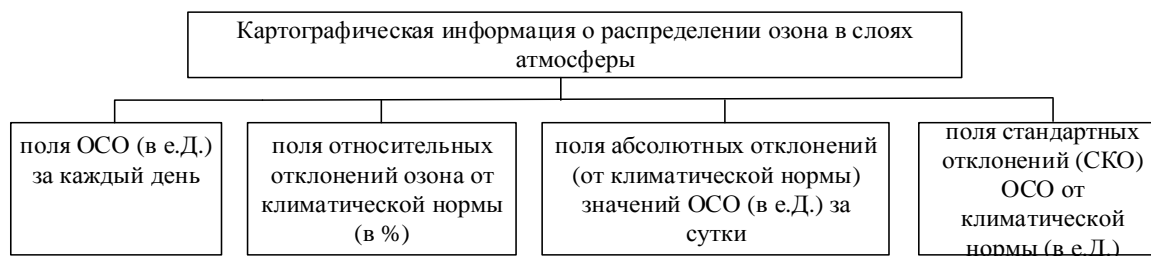


Рис. 2. Виды картографической информации о распределении озона в слоях атмосферы

Нормой ОСО принята величина, равная 300 е. Д. Избыток ОСО выше 300 е. Д. соответствует положительной аномалии, ОСО менее 300 е. Д. соответствует отрицательной аномалии. Приоритет имеют исследования мощных аномалий ОСО, так как на их примере можно более детально проследить, способны ли наши модели адекватно описывать фактические процессы в атмо-

сфере. Под мощными отрицательными аномалиями ОСО (далее – «озоновая дыра») понимаются отрицательные отклонения от нормы, превышающие стандартное отклонение более чем в 2,5 раза (для суточных аномалий – более чем на четверть). Так, в районе Южного полюса «озоновая дыра» с начала 1980-х гг. наблюдается ежегодно с августа по ноябрь-декабрь, занимая площадь – порядка 30 млн. км<sup>2</sup>. Минимальные значения ОСО в такой отрицательной аномалии отмечались ниже 100 е. Д. По аналогии с «озоновой дырой» существует понятие озоновая «мини-дыра». Под озоновыми «мини-дырами» понимают отрицательные аномалии ОСО, сходные с «озоновыми дырами», при которых значения ОСО отмечаются ниже 220 е. Д. Отрицательные аномалии ОСО класса «мини-дыры», в отличие от «озоновой дыры» – это кратковременные (до недели) отрицательные вариации ОСО, занимающие относительно небольшие площади (порядка 3 млн. км<sup>2</sup>) и обусловленные только особенностями синоптико-климатических процессов, например образованием глубоких высотных циклонов. Такие ситуации, наряду с Южным полушарием, встречаются и на севере Российской Федерации, вплоть до Урала.

Помимо синоптико-климатических причин возникновения аномалий ОСО важную роль в возникновении их вариаций играют и антропогенные факторы. Одним из таких факторов, влияющим на формирование отрицательных аномалий ОСО, является его разрушение в результате фотохимических реакций молекул озона с фторхлоруглеродами (ХФУ). Такие соединения способны находиться длительное время в атмосфере, что делает эти вещества еще более опасными для озона, особенно в Арктике в период полярных ночей [3]. Так, даже при начальном загрязнении ХФУ у поверхности земли они способны распространиться далее в нижние слои атмосферы и достигнуть стратосферы. На высотах порядка 20–25 км ультрафиолетовое излучение (УФ) приводит к разрушению устойчивых в стандартных условиях молекул ХФУ, которые распадаются на вещества, вступающие в разрушительную реакцию с молекулами озона (рис. 3).



Рис. 3. Механизм разрушения молекул озона ХФУ

Механизм этого воздействия заключается в том, что хлор (Cl), действуя подобно катализатору, сдвигает равновесие в процессах образования озона в сторону его уменьшения. Количество молекул хлора в процессе взаимодействия с озоном не уменьшается, вследствие чего одна молекула Cl может разрушить до 100 тыс. молекул O<sub>3</sub>. В итоге, каждая молекула резервуара поглощает фотон или вступает в реакцию с какой-нибудь другой молекулой, в результате чего она распадается, высвобождая Cl. Наряду с Cl, бром (Br) и его окиси (например, BrO) при их взаимодействии с O<sub>3</sub> также могут приводить к его интенсивному уничтожению. Подобное разрушение O<sub>3</sub> может также происходить в результате других химических процессов. Так, еще один антропогенный фактор разрушения озона – запуск ракет космического назначения (РКН) (особенно со ступенями на твердом топливе). При пусках тяжелых РКН «Сатурн-5» временно регистрировались области с отрицательной аномалией ОСО. По данным модельных расчетов установлено, что запуск 125 РКН подобного типа может привести к формированию отрицательных аномалий ОСО в глобальном масштабе.

Из анализа вышеприведенных факторов, влияющих на распределение ОСО в Арктическом регионе, по своей значимости выделяется синоптико-климатический. В частности, для Арктического региона представляет интерес исследование процессов формирования мезополлярных вихрей и связанных с ними снижений ОСО в стратосфере при температурах ниже – 78°C. Динамика и масштабы развития синоптических процессов, а также планетарные мас-

штабы полей ОСО указывают на то, что наиболее эффективными инструментами для их контроля являются спутниковые средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

### РЕГИСТРАЦИЯ АНОМАЛИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

В сложившихся условиях для безопасного функционирования объектов Министерства обороны РФ, сохранения здоровья людей и поддержания удовлетворительного состояния местных экосистем в высокоширотных и полярных районах необходимы регулярные наблюдения за природно-климатическими условиями АЗРФ. Вместе с тем из-за отсутствия полноценной наземной озонметрической сети в Арктической зоне основными доступными инструментами для мониторинга ОСО являются спутниковые технические средства ДЗЗ.

Современная российская метеорологическая орбитальная группировка состоит из космических аппаратов (КА) серий «Метеор-М», «Ресурс-П», «Канопус-В», «Электро-Л» и «Арктика-М», «Кондор-ФКА». В ближайшее время ожидается пополнение космической группировки аппаратами «Кондор», «Ионосфера», «Аист» и «Луч» [4]. Далее в 2025–2026 гг. предусмотрено развертывание группировки «Сфера», в которой будут действовать несколько сотен КА серии «Беркут» и «Смотр». Технические средства дистанционного зондирования Земли, установленные на данных КА, позволяют получать оперативную информацию о состоянии озона в глобальном масштабе в виде поля ОСО. Основная информация спутниковых измерений состояния озона поступает от спектрофотометров TOMS (спутники «Метеор-3», NIMBUS-7, EARTH PROBE) и OMI (спутник AURA), производящих в течение суток надирные измерения уходящего УФ-излучения. С помощью данных приборов сформирован архив ежедневных глобальных измерений содержания озона в нижней стратосфере примерно за 35 лет.

Для анализа текущей спутниковой озонметрической информации в основном применяются данные солнечно-синхронных космических аппаратов типа Suomi-NPP и AURA Мирового центра данных наблюдений за озоном и УФ-радиацией (Канада) [5]. Наличие и масштаб аномалий ОСО оценивается по цифро-цветовой шкале и данным карты. Например, на карте ОСО за 10.03.2022 г. (рис. 4) голубой цвет означает, что в этот период наблюдалась отрицательная аномалия ОСО ниже нормального уровня в 300 е. Д. над значительной частью Арктической зоны РФ.

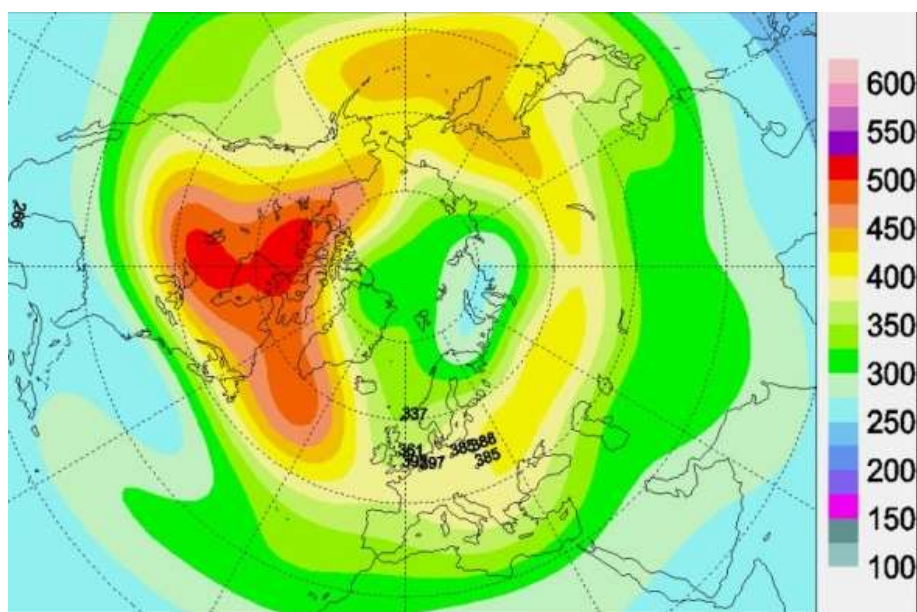


Рис. 4. Карта общего содержания озона за 10.03.2022 г. [5]

## СИНОПТИКО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ЗЕМЛИ В АПРЕЛЕ 2024 ГОДА

По данным ФГБУ «ААНИИ» [6] синоптическая обстановка в первую декаду апреля 2024 г. (рис. 5) характеризовалась следующим образом. Большую часть Европы, западную часть территории России и Арктический регион занимало обширное мало градиентное поле высокого давления. В Центральной и Восточной территории России наблюдались преимущественно области низкого давления.

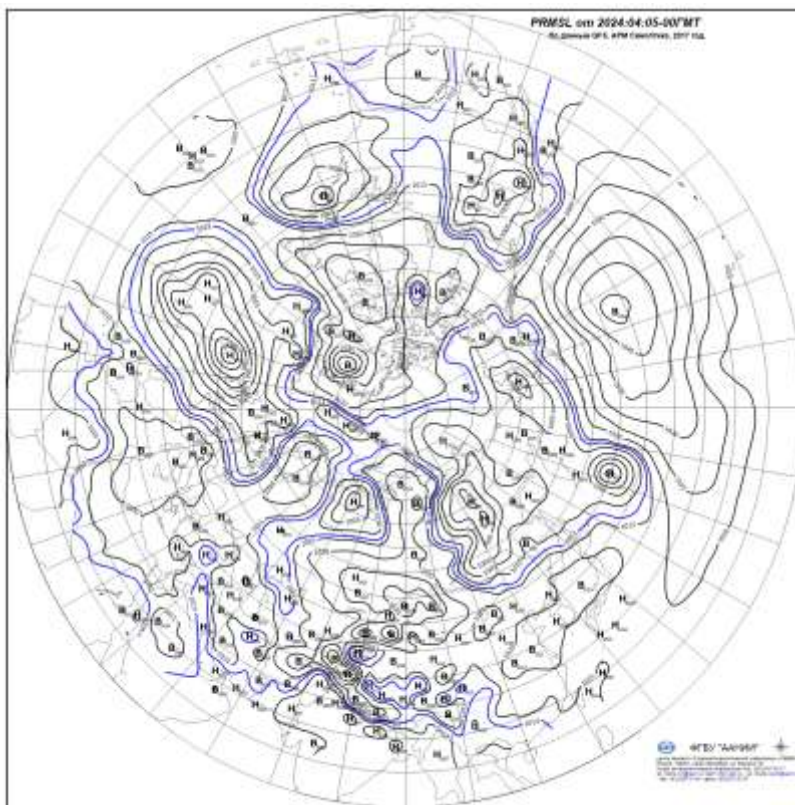


Рис. 5. Сборная карта синоптической обстановки в первой декаде апреля 2024 года [6]

Значительная часть России находилась в области положительных градаций среднемесячной температуры воздуха. На Европейской территории Российской Федерации (ЕТР) и Южном Урале нормы были превышены на 2–6°, а на Дальнем Востоке более чем на 2°. Вдоль арктической зоны России, а также на севере Урала и частично в Сибири наблюдалась холодная погода. В целом по территории страны средняя температура воздуха в апреле 2024 года находилась в первом десятке экстремально высоких значений за весь период регулярных метеорологических наблюдений, начиная с 1891 г. Аналогичное можно отметить и в отношении ЕТР, Северо-Кавказского, Южного, Центрального и юга Дальневосточного федерального округа – это был исторически максимально теплый апрель. В Поволжье он зафиксировался третьим самым теплым.

Летнюю жару испытала Европа в первую половину апреля. Новые максимумы температуры воздуха регистрировались от Греции и Испании до Беларуси, Украины. Показания термометров неоднократно фиксировались выше 30°C. В Польше зафиксирована самая ранняя дата с температурой выше +29°C, в Чехии – +30°C, а во Франции – +33°C. Прошедший апрель стал в целом для континента третьим самым теплым в истории наблюдений. Лидером остается апрель 2018 года.

В районах с высоким давлением в первой декаде апреля в Северном полушарии наблюдались повышенные уровни ОЗО [5], в том числе и в Арктическом регионе (рис. 6).

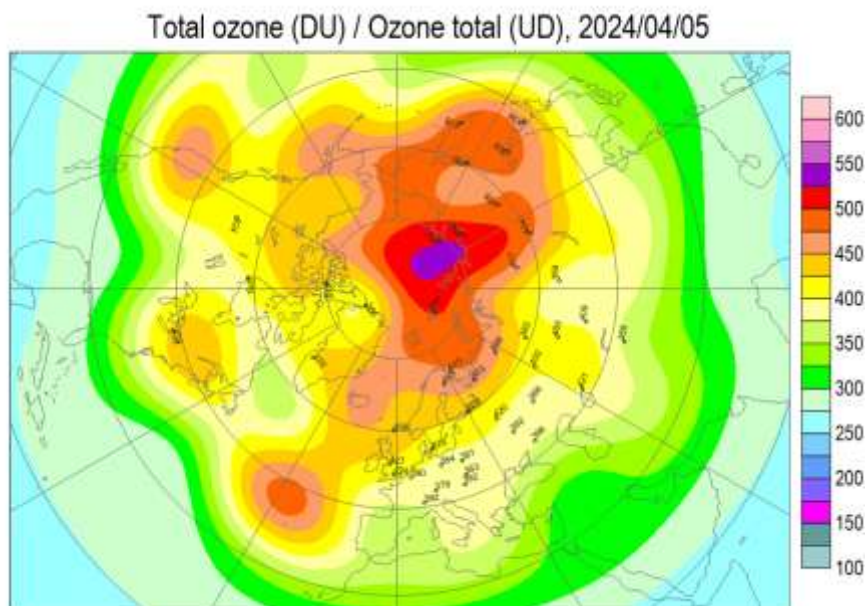


Рис. 6. Общее содержание озона в первую декаду апреля 2024 года [5]

В третью декаду синоптическая обстановка существенно изменилась (рис. 7) и континент накрыли холода. Теперь уже регистрировались новые минимумы температуры. В Центральной Европе столбики термометров упали до  $-5^{\circ}$ , а в горной местности – до  $-10^{\circ}$ . В результате этой компенсации в Западной и Центральной Европе средняя температура воздуха за апрель близка к норме, в Восточной – больше нее на  $2-3^{\circ}$ , а в Северной – меньше нормы.

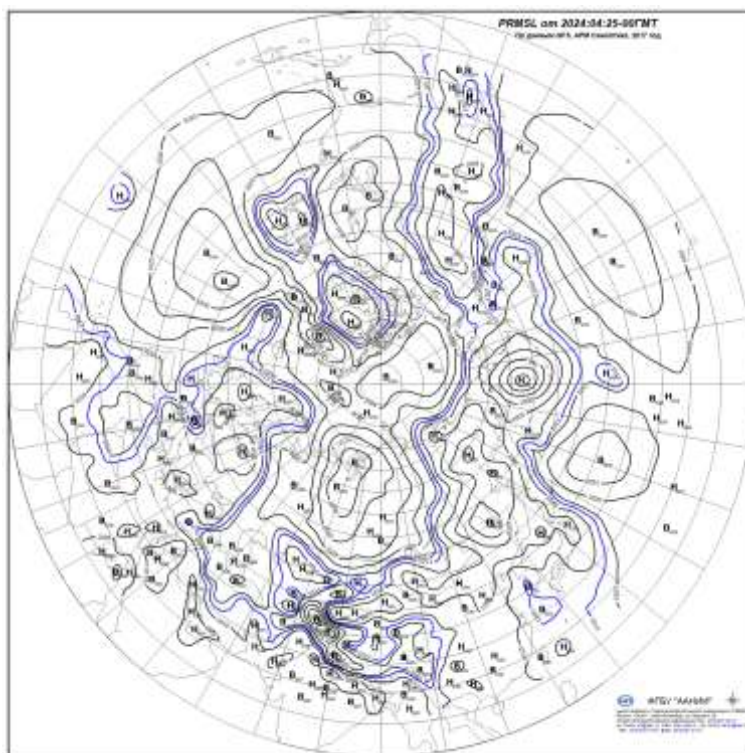


Рис. 7. Сборная карта синоптической обстановки в третьей декаде апреля 2024 года [6]

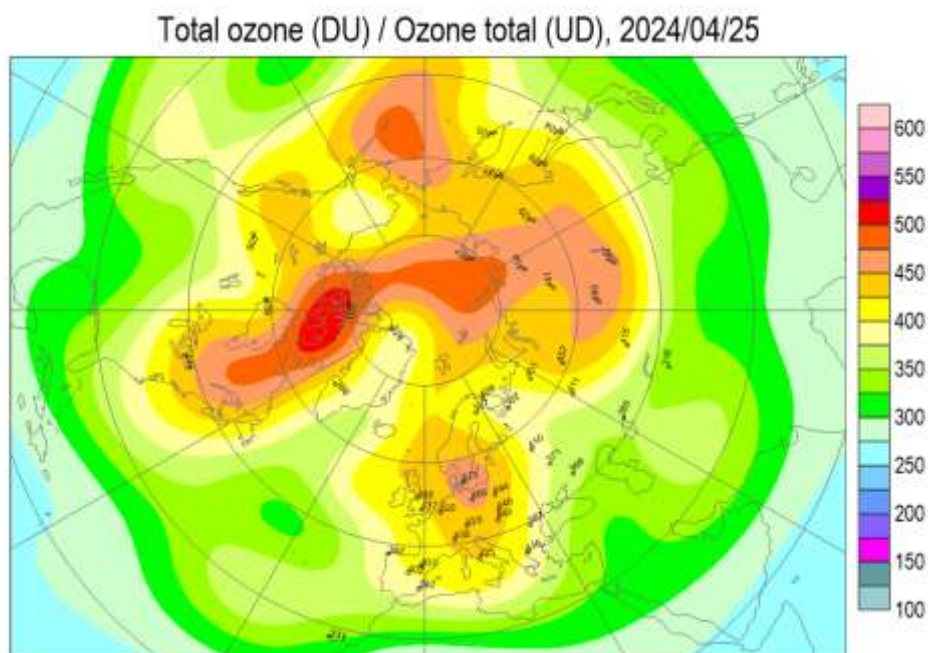


Рис. 8. Общее содержание озона в третью декаду апреля 2024 года [5]

В районах с высоким давлением в третьей декаде апреля в Северном полушарии также наблюдались повышенные уровни ОСО, в том числе и в Арктическом регионе. Прослеживается связь между районами с повышенным давлением на картах синоптической обстановки (рис. 5, 7) и областями с положительной аномалией содержания озона на картах ОСО (рис. 6, 8).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемый тренд синоптико-климатических процессов позволяет сделать вывод об их значимой взаимосвязи с аномалиями общего содержания озона, и в частности, с озоновыми «мини-дырами». Приведенные в статье карты синоптических процессов и динамики изменения уровней ОСО в Арктике показывают, что сезонные изменения ОСО в осенне-зимний и в ранний весенний периоды 2023–2024 гг. с наблюдаемыми отрицательными аномалиями ОСО, вплоть до уровней озоновых «мини-дыр», уже в апреле 2024 г. сменились положительными аномалиями ОСО, сопровождающимися областями повышенного давления на фоне повышенных температур тропосферы и нижней стратосферы.

Характер и масштабы изменения общего содержания озона, обусловленные климатическими и синоптическими процессами в стратосфере, говорят об их преобладающем влиянии в Арктической зоне по сравнению с антропогенными факторами. Это позволяет сделать вывод, что ХФУ и подобные химические вещества антропогенного происхождения не оказывают преобладающего разрушающего воздействия на состояние озонового слоя. Однако объяснить наличие в различные периоды года положительных и отрицательных аномалий содержания озона в атмосфере представляется возможным только с комплексной точки зрения, предусматривающей регулярные наблюдения за изменением климата и естественными синоптическими процессами в связке с измерениями ОСО.

Расширение исследований влияния антропогенных и синоптико-климатических факторов на формирование аномалий общего содержания озона на планете, и, в частности, в Арктическом регионе, весьма актуально на фоне современных глобальных климатических рисков и роста значимости региона.

### Список используемых источников

1. *Заблоцкий Р. А., Давыдов С. А., Тимощук А. С.* Контроль состояния озонового слоя в Арктическом регионе с помощью метеорологических спутников // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 685. – С. 84–91.
2. *Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Хлебопрос Р. Г.* Стратосферный озон: вид с космической орбиты : моногр. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 184 с.
3. *Доронин А. П., Тимощук А. С.* Воздействия на атмосферные процессы и явления. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. НИЦ «Планета». Космические аппараты. – URL : <https://planet.rssi.ru/> (дата обращения: 04.07.2024).
5. Карты общего содержания озона. – URL : <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/> (дата обращения: 04.07.2024).
6. Сборные карты полей приземного давления. – URL : <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/> (дата обращения: 04.07.2024).

И. А. Готюр,  
доктор технических наук, профессор;  
Ю. Д. Овчинников

## ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРЕДИКТОРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В работе рассмотрен вопрос информативности предикторов для оценивания прогнозируемого параметра в контексте обобщающей модели. Предложен метод оценки информационной матрицы Фишера с применением метода нормализующих потоков для аппроксимации эмпирической логарифмической функции правдоподобия дифференцируемым модельным распределением. Предлагаемый метод позволяет дать более высокую и надежную оценку нижней границы информативности предикторов в сравнении с известными эмпирическими методами за счет использования модели, учитывающей сложные нелинейные зависимости в данных.

Ключевые слова: информативность, информационная матрица Фишера, нормализующие потоки.

### ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития Вооруженных сил характеризуется все более широким применением постоянно усложняющихся технических систем. К таким системам, в частности, относятся различного рода авиационные комплексы, управляемые (корректируемые) артиллерийские вооружения, беспилотные системы, комплексы оптико-электронной-разведки и др.

Очевидно, что чем сложнее военно-техническая система, тем больше она зависит от состояния окружающей среды. Иными словами, правильный и полный учет физико-географических условий является определяющим при планировании применения современных видов оружия и ведения боевых действий (современных локальных вооруженных конфликтов).

Таким образом, одним из возможных направлений повышения эффективности применения систем вооружений является повышение качества прогнозов состояния природной среды.

Постоянное увеличение качества и объема метеорологических данных и непрерывное совершенствование прогностических моделей атмосферы являются теми факторами, благодаря которым становится возможным удовлетворять динамически растущим требованиям, предъявляемым к гидрометеорологическим прогнозам (рис. 1).

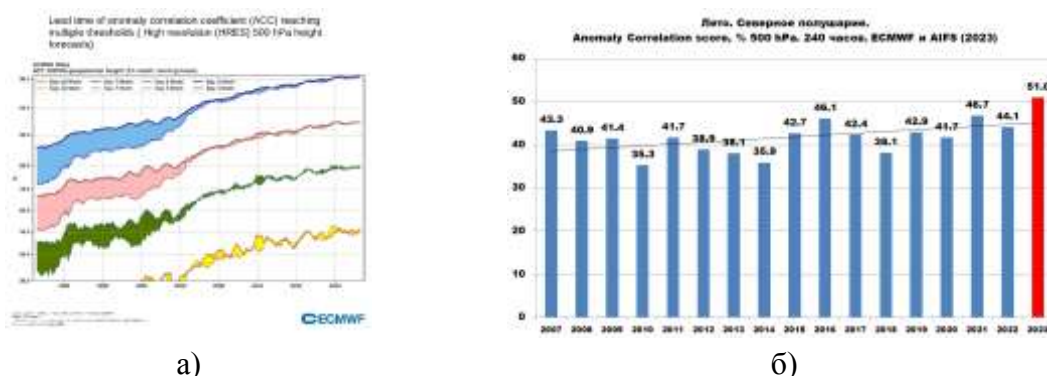


Рис. 1. Коэффициент корреляции аномалий (ACC) для прогнозирования высоты изобарической поверхности 500 hPa:  
а – гидродинамической моделью ECMWF HRES на 3, 5, 7 и 10 суток;  
б – гидродинамической моделью ECMWF (до 2023 г.) и комбинированной моделью AIFS (2023) в Северном полушарии на 10 суток



При этом, в контексте синтеза прогностических моделей, вопросам оптимальной селекции предикторов уделено недостаточное внимание [1]. Так, ряд исследователей полагают, что прогностические модели глубокого машинного обучения следует обучать на всех доступных данных [2].

Анализ работ, посвященных данному направлению [3, 4], показывает, что для обучения современных прогностических моделей следует производить предварительную селекцию предикторов на основе критериев физической осмысленности и максимизации информативности.

Таким образом, возникает задача оценки нижней границы информативности подмножества предикторов в отношении прогнозируемого параметра в контексте конкретной обобщающей модели – оптимального оценщика.

## МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ФИШЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НОРМАЛИЗУЮЩИХ ПОТОКОВ

Запишем выражение для информационной матрицы Фишера (ИМФ) [6]:

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[ \left( \frac{\partial L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right) \left( \frac{\partial L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)^T \right], \quad (1)$$

где  $L(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$  – логарифмическая функция правдоподобия для параметра  $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^d$  и наблюдаемых данных  $\mathbf{x}$ ;

$\mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}}[\dots]$  – математическое ожидание при фиксированном  $\boldsymbol{\theta}$  для всех возможных  $\mathbf{x}$ .

Информационная матрица Фишера, интерпретируемая как локальная мера чувствительности логарифмической функции правдоподобия к параметру, используется для получения оценки информативности предикторов.

Под информативностью будем понимать некоторый выпуклый функционал от ИМФ – измеримую скалярную величину [7]. С точки зрения решаемой задачи, полезным свойством выбранной меры информативности является то, что она естественным образом учитывает отношение сигнал/шум в данных [9].

Практически используются следующие критерии информативности:

1) А-критерий – среднее значение дисперсий оценок модели:

$$\Phi_A[\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})] = \text{tr}[\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})]; \quad (2)$$

2) D-критерий – объем гипер-эллипса неопределенности оценок параметров:

$$\Phi_D[\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})] = |\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})|; \quad (3)$$

3) E-критерий – наибольшая неопределенность оценки параметров модели:

$$\Phi_E[\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})] = \lambda_{\max}[\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})]. \quad (4)$$

Существует ряд подходов, позволяющих оценить ИМФ [15]:

– метод с использованием статистических моментов градиента функции потерь (FIML, *Fisher Information Matrix Laplace*), позволяющий получить приближенную оценку ЭМФ;

– метод с использованием градиентов функции потерь по параметрам модели, вычисленных во время обратного распространения ошибки (EF, *Empiric Fischer*);

– метод с использованием градиентов функции потерь по параметрам модели, учитывающий инверсное масштабирование проекций предикторов (iEF, *improved Empiric Fischer*).

Ограничения на точность первых двух методов накладывают проблемы, связанные с инверсным масштабированием проекций входных векторов. Метод iEF в значительной степени свободен от данного недостатка. Оценка ИМФ, как показано в исследованиях, также может быть получена в закрытой форме для некоторых обобщающих моделей и архитектур нейронных сетей [12].

Кроме того, все перечисленные методы обладают рядом существенных недостатков:

- сравнительно невысокая точность оценки ИМФ при высокой стоимости обучения моделей;
- риск переобучения моделей в процессе многократного прогона с целью оптимизации подмножества предикторов.

С целью снижения влияния указанных недостатков предлагается оценивать ИМФ в соответствии с определением (1), непосредственно дифференцируя логарифмическую функцию правдоподобия  $L(\theta|\mathbf{x})$  по параметру  $\theta$ . Данный метод подразумевает наличие дифференцируемой оценки  $\hat{L}(\theta|\mathbf{x})$  и способа оценивания.

Оценку логарифмической функции правдоподобия  $\hat{L}(\theta|\mathbf{x})$  для параметра  $\theta$  определим как логарифм оценки условной плотности распределения параметра  $\hat{p}(\theta|\mathbf{x})$  при наблюдаемом предикторе  $\mathbf{x}$  в соответствии с выражением

$$\hat{L}(\theta|\mathbf{x}) = \log \hat{p}(\theta|\mathbf{x}); \quad (5)$$

Для оценивания информативности предикторов как некоторого функционала от ИМФ необходимо аппроксимировать эмпирическую условную плотность распределения параметра  $p(\theta|\mathbf{x})$  модельной функцией одним из известных способов. Учитывая ограничения, накладываемые на решаемую задачу, авторами предлагается использовать метод аппроксимации сложных эмпирических распределений многомерным нормальным – метод нормализующих потоков (NF, *Normalizing Flow*) [13].

Примем следующие обозначения:

1)  $\mathbf{X}$  – реализация многомерной случайной величины с плотностью распределения  $p(\mathbf{X}), \mathbf{X} = \{\mathbf{x}|\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{d+1}\}$ ;

2)  $\Theta$  – некоторое подмножество  $\mathbf{X}$ , реализация оцениваемых параметров,  $\Theta = \{\theta\}, \Theta \subset \mathbf{X}$ , такое, что для вектора  $\mathbf{x}$  справедливо следующее:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{\setminus\theta}, \theta], \mathbf{x}_{\setminus\theta} \in \mathbb{R}^{d+1-\dim \theta}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{x}_{\setminus\theta}$  – компонент вектора  $\mathbf{x}$ , содержащий все параметры из  $\mathbf{x}$ , не входящие в  $\theta$ ;

3)  $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^d$  – вектор измерений реализации  $\mathbf{X}$  для дискретного времени  $k \in \mathbb{Z}$ ;

4)  $\mathbf{x}_{1:N} = \{\mathbf{x}_k | k = \{1, 2, \dots, N\}\}$  – временной ряд наблюдений из  $N$  последовательных измерений на интервале времени  $\mathbf{t}_{\text{набл.}} = \{t_1, t_2, \dots, t_N = T\}$  – вектор предикторов.

Полагаем, что для любого  $\mathbf{x}_{1:N}$  существует некоторая достаточная статистика  $T(\mathbf{x}_{1:N})$ , позволяющая оценить параметр  $\theta$  на временном шаге  $k = N + 1$  на основе вектора предикторов  $\mathbf{x}_{1:N}$ , включающего реализацию самого оцениваемого параметра на интервале  $[1, N]$ :

$$\hat{\theta}_{N+1} = T(\mathbf{x}_{1:N}). \quad (7)$$

Зададим случайную величину  $\mathbf{z}$  плотностью ее распределения:

$$p_{\mathbf{z}}(\mathbf{z}) = \mathcal{N}(\mathbf{z}|0, \mathbf{I}), \mathbf{z} \in \mathbb{R}^d, \quad (8)$$

где  $\mathcal{N}(\mathbf{z}|0, \mathbf{I})$  – базовое многомерное нормальное распределение.

Тогда случайная величина  $\theta_{N+1}$ , (оцениваемый параметр на временном шаге  $k = N + 1$ ) может быть выражена следующим образом:

$$\boldsymbol{\theta}_{N+1} = \mathbf{f}(\mathbf{z}), \quad (9)$$

где  $\mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1})$  – некоторая обратимая дифференцируемая биекция.

В соответствии с методом нормализующих потоков, биекция  $\mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1})$  представляется композицией последовательных преобразований  $f_i(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1})$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1}) &= f_K \circ f_{K-1} \circ \dots \circ f_1(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1}); \\ \boldsymbol{\varphi}_{N+1} &= \{\varphi_{N+1}^{(i)} | i = \{1, 2, \dots, K\}\}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\boldsymbol{\varphi}_{N+1}$  – вектор параметров нормализующего потока.

Итоговое выражение для оценки логарифмической функции правдоподобия для параметра  $\boldsymbol{\theta}$  методом нормализующих потоков может быть получено в следующем виде:

$$\hat{\mathbf{L}}(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x}) = \log \hat{p}(\boldsymbol{\theta}_{N+1}|\mathbf{x}_{1:N}) = \log p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{z}) - \sum_{i=1}^K |J_f^{(i)}|. \quad (11)$$

где  $J_f^{(i)}$  – якобиан преобразования  $f_i(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1})$ ,

$$J_f^{(i)} = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{z}_{i-1}}. \quad (12)$$

Обозначим  $S(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x}) = \frac{\partial \hat{\mathbf{L}}(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})}{\partial \boldsymbol{\theta}}$  – градиент аппроксимированной логарифмической функции правдоподобия. Поскольку оценки распределений, полученные методом нормализующих потоков, дифференцируемы,  $S(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$  может быть получена в явном виде.

Тогда оценка ИМФ  $\hat{\mathbf{F}}(\boldsymbol{\theta})$  может быть записана как математическое ожидание непрерывной случайной величины в форме интеграла по переменной  $\mathbf{x}$ :

$$\hat{\mathbf{F}}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}}[S(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})S^T(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})] = \int_{\mathbf{x}} S(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})S^T(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})d\mathbf{x}. \quad (13)$$

Но ввиду того, что аналитическая форма для выражения (6) может быть найдена только для некоторых специальных случаев аппроксимирующих распределений  $p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{z})$  и нормализующих потоков  $\mathbf{f}(\mathbf{z})$ , на практике производится дискретизация градиента модельного распределения  $S(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$  и математическое ожидание квадрата матрицы градиентов ищется в форме

$$\hat{\mathbf{F}}(\boldsymbol{\theta}) \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S^{(i)}(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x}) \left(S^{(i)}(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})\right)^T, \quad (14)$$

где  $M$  – количество отсчетов  $S^{(i)}(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$  дискретной формы  $S(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{x})$ .

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С применением модели нормализующих потоков аппроксимирована эмпирическая плотность условной вероятности распределения наблюдаемых данных: предикторов и прогнозируемого параметра, и с использованием полученной аппроксимации произведена оценка информативности.

Моделирование производилось на данных глобальной наземной сети метеорологических наблюдений NOAA ISD (*Integrated Surface Data*). В работе использовались сообщения от ав-

томатических синоптических метеорологических станций в международном формате FM-12 (*Synop*) за период с 2020 по 2024 год. Данные от автоматических станций обладают важными для машинного обучения свойствами: регулярностью и неизменностью характеристик (в частности, размерности) вектора основных измеряемых параметров тропосферы во времени (приземной температуры воздуха, относительной влажности и др.).

Обучение модели производилось на выборке данных, размер которой по времени не превышает длительности одного климатического периода, а также с учетом сезонности для конкретного физико-географического района. Такой отбор был произведен с целью соблюдения условия неизменности (консистенности) выборки в пространстве и времени относительно обобщаемых моделью параметров процесса, производящего наблюдаемые данные.

В качестве исходных данных, удовлетворяющих требованиям к выборке, выбраны наблюдения для летних месяцев по району Ленинградской области – в радиусе 250 км от центра Санкт-Петербурга (синоптической станции с международным идентификатором (USAF) 26063).

Таким образом, вектор предикторов представляет собой временной ряд значений некоторых основных параметров тропосферы: скорости ветра на высоте 10 метров, направления ветра, температуры воздуха, температуры точки росы, приземного атмосферного давления. Ряд составлен из дискретной по времени последовательности значений перечисленных параметров с интервалом 1 час общей продолжительностью  $\tau = 12$  часов (рис. 2).



Рис. 2. Визуализация данных обучающей выборки:

*а – пространственная конфигурация сети – источника данных; б – временные ряды измерений для синоптической станции Пулково (26063)*

В качестве оцениваемого параметра, условное распределение которого аппроксимировано моделью нормализующих потоков, рассмотрена вероятность наблюдения конвективных ливневых осадков на интервале заблаговременности  $t_{\text{забл.}} = +6$  ч.

Вероятность конвективных ливневых осадков в настоящее время с достаточно высокой точностью прогнозируется мезомасштабными моделями на сверхкраткосрочных временных интервалах как с применением статистического подхода, так и с использованием моделей глубокого машинного обучения. Таким образом, в дальнейшем можно будет сравнить свойства оценки прогнозируемых параметров – точности, надёжности (дисперсии при двухмоментной аппроксимации вероятностных свойств оценки) – для различных прогностических моделей.

Большое внимание уделено предварительной подготовке данных – нормализации и фильтрации – устранению выбросов, пропусков и других аномалий, поскольку аномалии в данных способны резко снизить качество обучения в зависимости от их относительного количества в выборке. С целью минимизации риска ошибочного захвата внимания модели данными

с большей амплитудой, данные для обучения модели нормализованы – нормированы и центрированы своими распределениями, поскольку модели чувствительны к масштабу входных переменных. Сознательно в исследовании не производилось снижение размерности векторов входных данных и их трансформация по методу главных компонент (МГК) PCA (*principal component analysis*) [17], поскольку нас интересует информативность первичных компонент векторов предикторов для последующих действий:

- анализа точностных характеристик методов и моделей прогнозирования;
- оптимальной селекции предикторов [18, 19];
- оптимизации системы измерений и планирования эксперимента [5, 7].

С целью минимизации риска переобучения модели, а также преследуя цели увеличения вычислительной эффективности – ускорения путем горизонтального масштабирования процесса обучения, выборка поделена на 32 пересекающихся подмножества – батча (англ. *batch*).

Цель обучения модели – минимизация расстояния Кульбака – Лейблера, т. е. минимизация различия между модельным условным распределением и эмпирическим в информационном пространстве в контексте рассматриваемой вероятностной модели. Соответственно, для оптимизации параметров модели, согласно выбранному критерию, выбрана функция потерь  $L_{loss} = NLL$  – мера отрицательного правдоподобия, минимизация которой эквивалента минимизации расстояния Кульбака – Лейблера. Модель обучалась на протяжении 100 эпох с шагом для параметров, обеспечивающим сходимость обучения,  $\alpha = 10^{-5}$  (рис. 3).

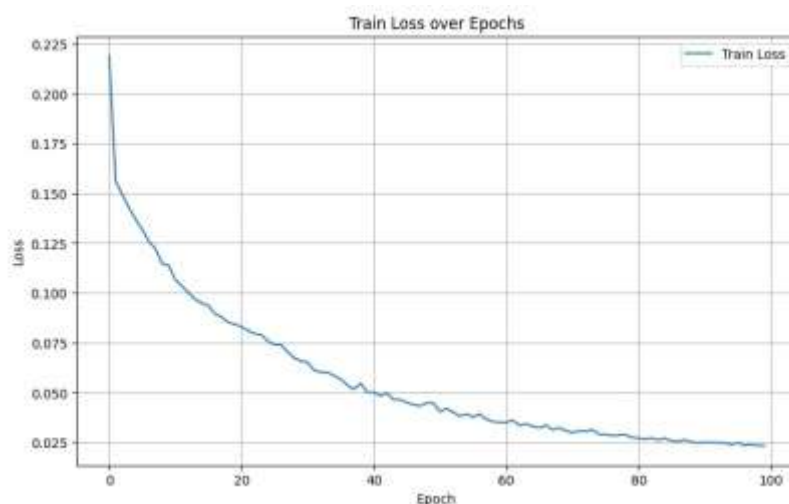


Рис. 3. Расстояние Кульбака – Лейблера для эпох обучения модели с LSTM-ячейками

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для выборки из данных ISD произведено моделирование условной плотности распределения предикторов и параметра методом нормализующих потоков и произведена оценка ИМФ предложенным методом – дифференцированием аппроксимированной логарифмической функции правдоподобия. Также произведена оценка ИМФ методом iEF (*improved Empiric Fischer*). Для полученных оценок ИМФ произведен расчет информативности в соответствии с D-критерием. Результаты численного моделирования представлены на рис. 4.

Сравнивая результаты, полученные существующим методом и предложенным авторами, можно заключить, что оценка информативности, полученная предложенным методом, обладает следующими преимуществами:

- численно превосходит оценку, полученную существующим методом, что можно интерпретировать как извлечение моделью большего количества информации для оценки параметра из вектора предикторов;
- оценка предложенным методом обладает меньшей дисперсией, что в случае двухмоментной аппроксимации позволяет сделать вывод о лучшей точности предложенной оценки.

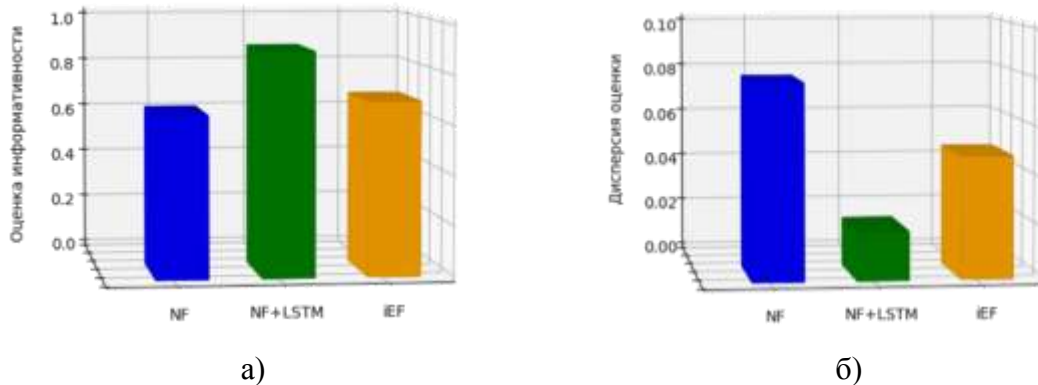


Рис. 4. Результаты численного моделирования:

- а – оценка нижней границы информативности методами *NF*, *NF+LSTM*, *iEF*;  
 б – дисперсия оценки нижней границы информативности методами *NF*, *NF+LSTM*, *iEF*

Таким образом, предложенный метод оценки информативности позволяет извлечь больше информации из предикторов, формально – дать более высокую оценку нижней границы информативности. Оценка, полученная предложенным методом, обладает меньшей дисперсией, т. е. более надежна.

Потенциально, указанные преимущества метода позволяют с его применением создать прогностическую модель для оцениваемых параметров, обладающую лучшей точностью и способностью обобщать более сложные пространственно-временные зависимости в данных.

Извлечение большего количества информации из данных достигнуто ценой усложнения обобщающей модели – сложных многомерных нормализующих потоков, соответствующего увеличения вычислительной стоимости обучения модели и создания оценки информативности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку в контексте метеорологических данных для оценки условных распределений параметров чрезвычайно важны не только сами значения параметров и предикторов, но и их динамика (временные тренды), то для дальнейшего увеличения качества оценки информативности следует модифицировать модель нормализующих потоков так, чтобы наделить ее способностью обобщать темпоральный (временной) признак в данных, т. е. работать с временным контекстом в рядах измерений и реализациях случайных процессов.

Для того, чтобы сделать это, авторы предлагают дополнить модель нормализующих потоков ячейками LSTM (*Long short-term memory*). Ожидается, что предложенный подход позволит извлечь из данных больше информации и дать более высокую оценку нижней границы информативности ценой усложнения модели.

**Список используемых источников**

1. *Haury, A. C., Gestraud, P., Vert, J. P.* The influence of feature selection methods on accuracy, stability and interpretability of molecular signatures // PLoS ONE. – 2011. – № 6(12).
2. Attention is All you Need / A. Vaswani [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems 30. – USA, CA, Long Beach, 2017. – P. 5998–6008.
3. *Guyon I., Elisseeff A.* An introduction to variable and feature selection // Journal of Machine Learning Research. – 2003. – № 3. – P. 1157–1182.
4. *Chandrashekar G., Sahin F.* A survey on feature selection methods // Computers & Electrical Engineering. – 2014. – № 40(1). – P. 16–28.
5. *Пичугин Ю. А.* Особенности использования информации по Шеннону в задачах, связанных с линейной регрессией // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2019. – № 12(3). – С. 14–20.
6. *Кульбак С.* Теория информации и статистика : пер. с англ. – М. : Наука, 1967. – 678 с.
7. *Покровский О. М.* Оптимизация метеорологического зондирования атмосферы со спутников. – Л. : Гидрометиздат, 1984. – 264 с.
8. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии / В. С. Комаров [и др.]; под общ. ред. Г. Г. Матвиенко. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 236 с.
9. *Кульбак С., Лейблер Р. А.* Об информации и достаточности // Теория информации и статистика. – М. : Наука, 1967. – С. 343–386.
10. *Шеннон К., Уивер У.* Математическая теория связи // Математическая теория связи. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – С. 9–115.
11. An Improved Empirical Fisher Approximation for Natural Gradient Descent / X. Wu [et al.]. – URL : <https://arxiv.org/abs/2406.06420> (дата обращения: 04.12.2024).
12. *Soen A., Sun K.* On the Variance of the Fisher Information for Deep Learning. – URL : <https://arxiv.org/abs/2107.04205> (дата обращения: 04.12.2024).
13. *Papamakarios G., Nalisnick E., Rezende D.J., Mohamed S., Lakshminarayanan B.* Normalizing Flows for Probabilistic Modeling and Inference, 2019. – URL : <https://arxiv.org/abs/1912.02762> (дата обращения: 04.12.2024).
14. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long short-term memory // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, № 8. – P. 1735–1780.
15. NICE: Non-linear Independent Components Estimation / L. Dinh [et al.]. – URL : <https://arxiv.org/abs/1410.8516> (дата обращения: 04.12.2024).
16. Neural Spline Flows / C. Durkan [et al.] // In Advances in Neural Information Processing Systems. – 2019. – № 32. – P. 7509–7520.
17. *Шемелов В. А.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации : учеб. пособие : в 2 ч. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – Ч. 2. – 134 с.
18. *Zhou H., Wang X., Zhu R.* Feature selection based on mutual information with correlation coefficient // Applied Intelligence. – 2022. – Vol. 52, № 5. – P. 5457–5474.
19. *Liu S., Motani M.* Improving Mutual Information based Feature Selection by Boosting Unique Relevance // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). – 2021. – P. 32–36.

Д. А. Авсюкевич,  
*доктор технических наук, профессор;*  
М. В. Егоричев

## **КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Рассмотрен вопрос применения интеллектуальных методов управления системой вентиляции и кондиционирования воздуха в специальных сооружениях для повышения их энергоэффективности. Для осуществления данной цели предложен интеллектуальный регулятор. Реализация предложенной концепции построения интеллектуальной адаптивной системы вентиляции и кондиционирования воздуха позволяет разработать такие алгоритмы управления, которые обеспечат автоматическую адаптацию параметров работы системы вентиляции и кондиционирования воздуха в условиях изменения внешних и внутренних факторов, влияющих на функционирование системы, при поддержании в сооружении оптимальных условий по температуре, влажности и чистоте воздуха в зависимости от фактической нагрузки.

Ключевые слова: система автоматического дистанционного управления, интеллектуальные методы управления, энергоэффективность, адаптивная система вентиляции и кондиционирования воздуха, система вентиляции и кондиционирования воздуха по фактическим потребностям.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Необходимость автоматизации процессов управления технологическими и техническими системами обуславливается все возрастающим объемом контролируемых параметров, а также сложностью применяемых алгоритмов управления. Эффективность целевых процессов эксплуатации, проходящих, например, на специальных сооружениях и сооружениях промышленности, в значительной степени определяется качеством функционирования систем дистанционного и автоматического управления (СДАУ) техническими системами, в том числе и системами вентиляции и кондиционирования воздуха (СВКВ).

Опыт эксплуатации типовых СДАУ показал их довольно низкую эксплуатационную надежность [1], сложность наладки, недостаточную стабильность в поддержании заданных параметров регулирования и неспособность системы оптимизировать режимы работы вентиляции и кондиционирования для повышения экономической эффективности работы оборудования. Тем самым несовершенство СДАУ СВКВ приводит к снижению эффективности применения данных систем, однако их потенциальные возможности так и продолжают находиться в скрытом состоянии, ожидая своей реализации.

Современное направление развития автоматизации характеризуется устойчивой тенденцией к созданию специальных управляющих вычислительных комплексов на основе использования микро-ЭВМ, программируемых логических контроллеров, методов искусственного интеллекта, что требует дополнительных финансовых затрат. В условиях недофинансирования многие организации не всегда имеют возможность выделения средств на эти цели.

Налицо противоречивая ситуация, характеризующаяся, с одной стороны, высокими требованиями к оперативности и надежности управления СВКВ специальных сооружений (СС), а с другой – невозможностью достижения этого в условиях ограниченных ассигнований, выделяемых на эксплуатацию СС. Разрешение данного противоречия составляет сущность актуальной научной задачи по разработке и обоснованию концепции построения интеллектуальной адаптивной СВКВ СС.



## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПУТЕЙ УЛУЧШЕНИЯ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Специальные технические системы (СТС) СС оснащены контрольно-измерительными приборами и системами автоматического управления для обеспечения надежной, безопасной и экономичной их эксплуатации. В целом СДАУ предназначена для автоматического, дистанционного и местного управления техническими системами. СДАУ СТС СС представляет собой совокупность совместно функционирующих систем управления:

- обеспечивающей централизованное (приоритетное) дистанционное управление техническими системами (ТС);
- обеспечивающих автоматическое и дистанционное управление СВКВ в различных СС;
- обеспечивающих автоматическое и дистанционное управление системами технического водоснабжения;
- обеспечивающих автоматическое и дистанционное управление системой холодоснабжения;
- обеспечивающих автоматическое и дистанционное управление системой внутреннего электроснабжения.

Структура СДАУ ТС СС показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема СДАУ СС

Анализ современного состояния автоматизации СВКВ в СС показывает, что СДАУ выполняют функцию регулирования (автоматического поддержания) температуры приточного воздуха. Задача управления в значительной мере усложняется вследствие непрерывного действия внешних и внутренних возмущений. Кроме функции регулирования осуществляется технологическая защита, предотвращающая возникновение аварий при нарушениях нормального режима работы основного и вспомогательного оборудования, и технологическая сигнализация о работе и состоянии агрегатов на мнемосхемах пульта управления.

В настоящее время при автоматизации СВКВ еще широко применяются разработанные в 70–80-е годы прошлого века алгоритмы управления:

- на типовых блоках управления (БУ) и типовых элементах (ТЭ);
- на типовых блоках, таких как блок логики (БЛ), блок задержек (БЗ), блок задержки команд (БЗК), блок мощности (БМ), блок питания (БП).

В первом случае алгоритм управления реализуется путем построения цепей соединения между типовыми элементами и схемами, конструктивно объединенными в одном блоке –

БУ. Во втором случае алгоритм управления реализуется путем построения внешних цепей соединения между элементами типовых блоков БЛ, БЗ, БЗК, БМ, БП.

К достоинствам этих СДАУ можно отнести постоянство поблочного состава применяемых пультов и стоек. Используя различный набор сборочных единиц, изменяя схемы блоков контроля и индикации и блоков модулей команд, набор перемычек на платах коммутации и схему кабельных соединений между сборочными единицами, можно менять алгоритм работы системы. Это позволяет создавать СДАУ для разных ТС из ограниченного числа унифицированных единиц.

К недостаткам, влияющим на экономическую эффективность работы СВКВ, можно отнести следующие:

- недостаточно полный учет возмущающих факторов, действующих в СВКВ;
- не учитывается взаимосвязь энергетических процессов, протекающих в системе кондиционирования воздуха (СКВ), вследствие чего управление не осуществляется по законам оптимального функционирования;
- жесткость СДАУ по структуре, что затрудняет возможность изменения законов функционирования и управления процессами, протекающими в СВКВ;
- функциональная ограниченность существующих СДАУ, их неспособность к дальнейшему развитию и усовершенствованию. Например, на торцах типовых блоков БЛ, БЗ, БЗК, БМ установлены специальные стержни для центровки и для механической блокировки, исключающей возможность установки блоков другого типа вместо данного.

Опыт эксплуатации типовых СДАУ ТС показал довольно низкую эксплуатационную надежность системы (рис. 2) [1], сложность наладки, недостаточную стабильность в поддержании заданных параметров регулирования и неспособность оптимизировать режимы работы СВКВ для повышения экономической эффективности работы оборудования.

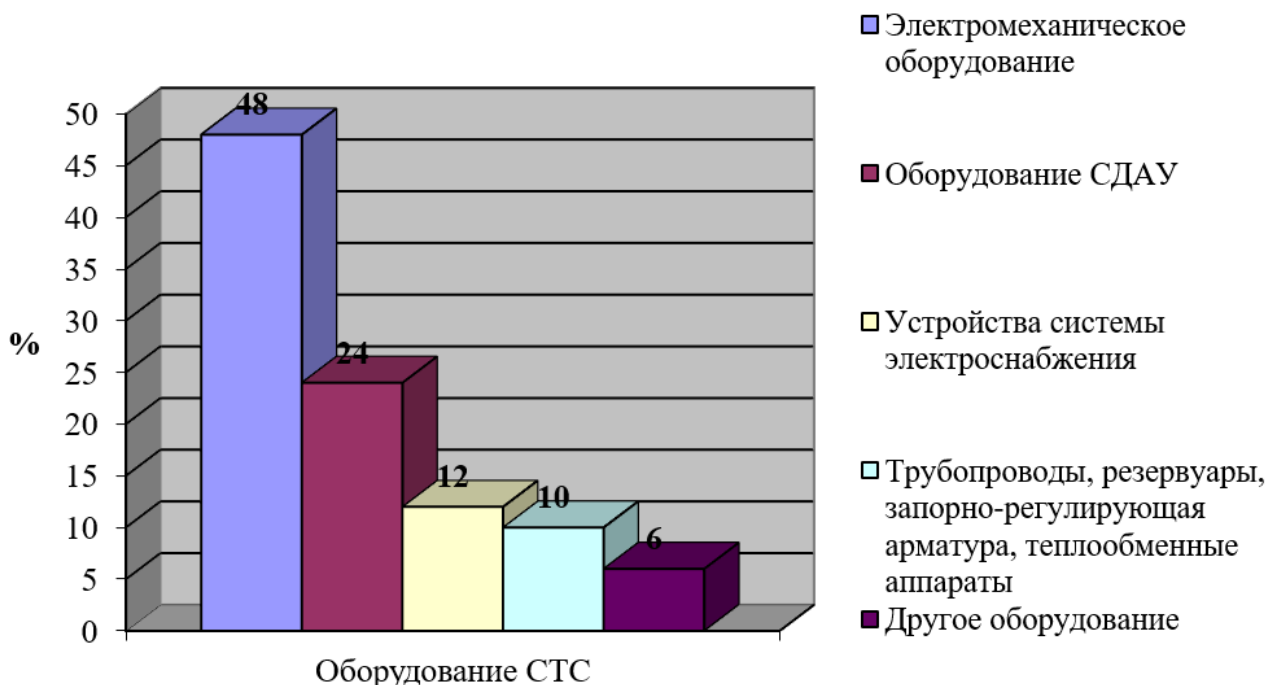


Рис. 2. Соотношение отказов оборудования СТС

В начале 2000-х годов развитие автоматизации характеризовалось устойчивой тенденцией к созданию специальных управляющих вычислительных комплексов на основе использования микро-ЭВМ, программируемых контроллеров. При этом учитывалось, что обеспечение теплом СВКВ и систем отопления СС осуществляется путем подачи в них теплоносителя

(перегретой воды с параметрами 150–170°C) из закрытых систем теплоснабжения. В свою очередь система отопления для обеспечения тепло-влажностного режима в сооружениях и штатного функционирования технологического оборудования подает в них теплоноситель уже с иными параметрами, а СВКВ подает в помещения сооружений требуемое количество воздуха с заданной температурой и влажностью.

Также учитывалось, что СВКВ имеет ряд особенностей, которые порождают специфические закономерности управления ими. К таким особенностям относятся:

- функциональная подчиненность СВКВ технологическим системам СС;
- управляемое функционирование в условиях постоянно изменяющихся параметров наружного климата, нестационарных источников и стоков тепла в обслуживаемых помещениях;
- повышенная ответственность («цены отказа») оборудования СВКВ и их СДАУ;
- функциональная взаимосвязь отдельного оборудования СВКВ через процессы энерго- и массообмена;
- для выполнения целевого назначения (создание необходимых условий функционирования технологического оборудования и жизнедеятельности личного состава) СВКВ в течение длительного времени находятся в рабочем режиме;
- значительная неравномерность потребления тепла, расходов вентилируемого воздуха, обусловленная наличием пиковых нагрузок в соответствии с графиком функционирования сооружения;
- СВКВ обладают временной избыточностью и временным резервом;
- недостаточное применение компьютерных и современных аппаратных средств при управлении оборудованием СВКВ;
- необходимость создания развитой системы вспомогательных технических средств контроля для обеспечения процессов оптимального управления СВКВ.

В связи с этим в тактико-технических требованиях к СДАУ в начале 2000-х годов существовала тенденция повышения эффективности функционирования СВКВ за счет разработки и внедрения более совершенных способов и средств управления. В процессе функционирования СДАУ СВКВ должна быть способна решать следующие задачи:

- автоматически регулировать параметры в диапазоне нормальных эксплуатационных нагрузок;
- периодически по алгоритмам оптимизации определять оптимальное значение регулирования величин и формировать задающие и управляющие воздействия на органы управления;
- осуществлять автоматические переключения в технологической схеме СВКВ для предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций;
- выполнять контроль параметров состояния оборудования СВКВ (текущий и по вызову);
- производить подсчет и регистрацию технико-экономических и отчетных показателей работы оборудования СВКВ.

На основе анализа задач, возлагаемых на СДАУ СВКВ перспективных СС при оптимальном управлении, стало очевидно, что эти задачи не могут быть решены средствами обычной автоматики СВКВ (типовыми блоками) прежде всего из-за функциональной ограниченности существующих СДАУ. Для практической реализации оптимального управления СВКВ наиболее целесообразным стало применение СДАУ, основанных на передовых, на тот момент, информационных технологиях, на применении современных аппаратных и программных средств.

Достоинствами СДАУ на основе современных аппаратных и программных средств являются:

- способность реализовать законы программного и оптимального управления;
- возможность создания быстродействующего управления с учетом значительного количества возмущающих факторов;
- возможность разработки унифицированных СДАУ для различных типов СВКВ;

- способность принимать практически мгновенные решения при аварийных ситуациях;
- возможность решения сложных диагностических задач при отказе оборудования.

Принципиально новая для СВКВ система управления на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК) позволила создать СДАУ, способную удовлетворить всем вышеперечисленным требованиям.

Основанием для создания СДАУ на базе ПЛК было следующее:

- особенности, заложенные в принципах работы ПЛК, позволяют путем изменения программной части внедрять более совершенные законы управления, реализующие методы оптимизации режимов работы СВКВ;
- определенная избыточность по техническим характеристикам ПЛК (объем памяти, быстродействие, число входов и выходов) позволяет осуществлять модернизацию СДАУ с незначительными экономическими и временными затратами;
- применение ПЛК для управления значительно уменьшает массогабаритные характеристики СДАУ, что особенно важно при создании СВКВ в СС.

Основными структурно-элементными единицами СДАУ являются: ПК, ПЛК, мониторы (сенсорные панели), устройства ввода информации, блоки питания, модули ввода дискретных сигналов, модули вывода дискретных сигналов, модули ввода аналоговых сигналов, модули вывода аналоговых сигналов, служебные модули, а также применяемое программное обеспечение (ПО).

СВКВ СС являются крайне энергоемкими системами, на совокупность помещений данных сооружений может приходиться от 35 до 85% всей потребляемой электрической мощности. Вследствие чего вопросы повышения энергоэффективности СВКВ СС являются актуальными. Энергоэффективные сооружения требуют пересмотра подхода, применяемого при определении количества приточного воздуха. Традиционные СВКВ запроектированы на расчетную тепловлажностную нагрузку без возможности регулирования воздухообмена. Современная автоматизированная система управления должна реализовывать адаптацию процесса работы СВКВ при изменении внешних и внутренних условий функционирования, когда СВКВ обеспечивает поддержание в сооружениях комфортных условий по температуре, влажности и чистоте воздуха по потребности, т. е. по фактической, а не по расчетной нагрузке. СДАУ на основе ПЛК в большинстве случаев не могут обеспечить эту адаптацию, не могут учесть нелинейность и многосвязность параметров микроклимата в сооружениях, не могут учесть и обработать все факторы, необходимые для регулирования СВКВ по фактической нагрузке. Поэтому для решения указанной задачи необходимо использовать технологии искусственного интеллекта [2–4].

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Интеллектуальные методы управления позволяют получить высокие показатели регулирования при значительной нелинейности объекта и наличии большого количества возмущающих факторов. Сигналом для регулирования воздухообмена в адаптивной СВКВ могут быть требуемые параметры микроклимата и чистоты воздуха в помещениях:  $t_{вв}$  – температура воздуха в помещении,  $\phi_{вв}$  – относительная влажность воздуха в помещении,  $g_{вв}$  – концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе помещения;  $F$  – чистота воздуха. Сигналы с датчиков определяют текущее состояние СВКВ. Далее происходит обработка этих сигналов, их сопоставление с возмущающими воздействиями, корректировка режима работы СВКВ, формирование управляющих сигналов, поступающих на частотно-регулируемые приводы приточных и вытяжных вентиляторов, на регулирующую арматуру воздухонагревателей и воздухоохладителей, на регулирующую воздушные заслонки. Таким образом, происходит изменение расхода

приточного воздуха в сооружении. Детерминированное описание зависимости требуемых параметров микроклимата и чистоты воздуха в помещениях от параметров наружного воздуха и фактической нагрузки, как правило, отсутствует либо его получение достаточно трудоемко.

В этих условиях во многих исследованиях предлагается использовать нечеткий регулятор, являющийся одним из элементов автоматизированной системы управления. Алгоритм и правила работы нечеткого регулятора предлагается формировать с помощью нейронной сети. В настоящее время использование нейросетевых регуляторов для управления интеллектуальной адаптивной СВКВ является наиболее перспективным направлением, потому как позволяет улучшить адаптационные способности СВКВ за счет применения гибкой технологии управления [5, 6]. В этой связи актуальной задачей является формирование концепции построения интеллектуальной адаптивной СВКВ, использующей в своей работе интеллектуальный регулятор (интеллектуальную подсистему управления параметрами микроклимата).

Интеллектуальный регулятор состоит из четырех основных блоков: блока текущего состояния СВКВ, базы моделей, базы знаний, нейросетевого алгоритма управления СВКВ.

Структура интеллектуального регулятора представлена на рис. 3.

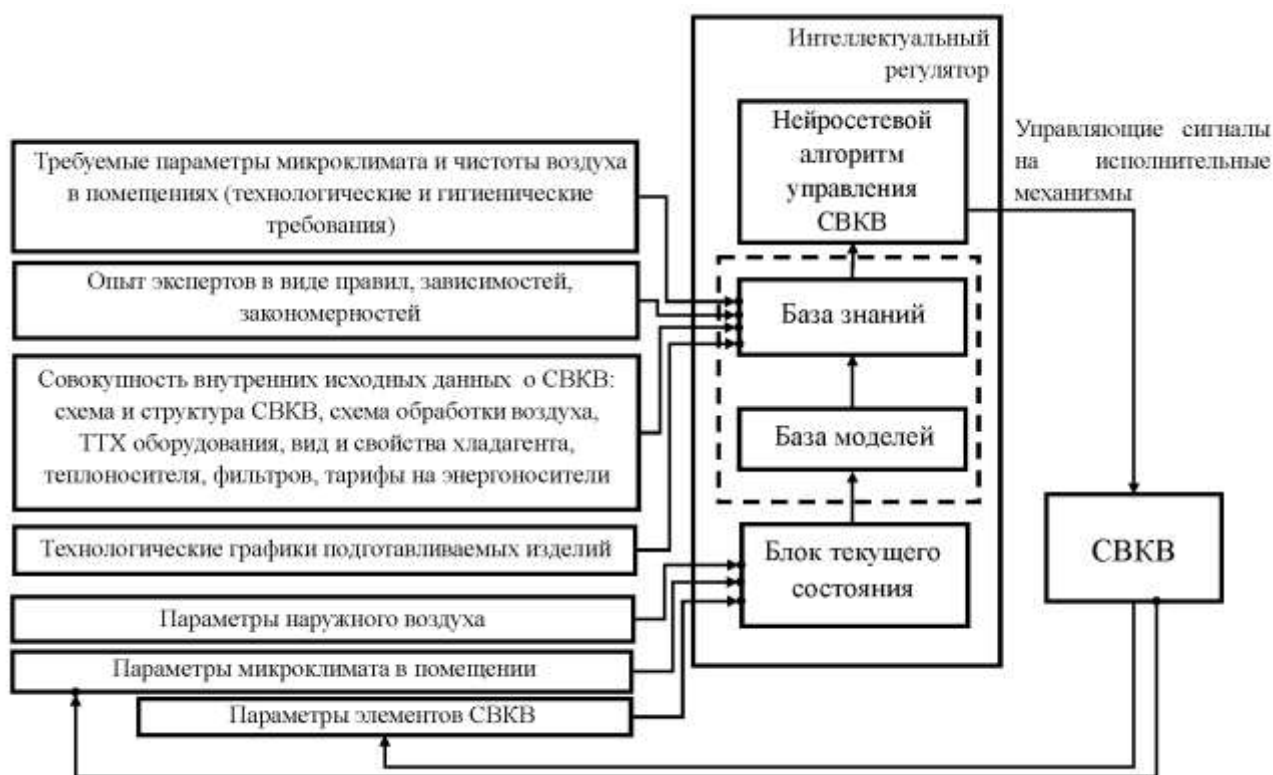


Рис. 3. Структура интеллектуального регулятора СВКВ

Блок текущего состояния СВКВ на основании показаний с датчиков, расположенных в сооружении и на исполнительных механизмах, определяет текущее состояние микроклимата и положение элементов СВКВ, формирующих расход приточного воздуха в сооружении.

База моделей включает в себя комплекс локальных моделей, необходимых алгоритму для вычисления частных параметров приточного воздуха в сооружении в зависимости от фактической нагрузки. Эти модели требуются для прогнозирования изменения параметров микроклимата в помещениях сооружений. К локальным моделям относятся: математические модели процессов тепло- и влагообмена в помещениях с изменяющимися во времени (динамическими) параметрами температурно-влажностного режима и чистотой воздуха; модели совместного учета показателей качества воздуха, расхода воздуха и энергопотребления

СВКВ; модели динамического изменения воздушного режима в помещениях с учетом имеющихся ограничений по энергоресурсам и иные модели.

База знаний содержит опыт экспертов в виде правил по регулированию расхода приточного воздуха в сооружениях в зависимости от фактической нагрузки. База знаний должна быть приспособлена для обучения нейронной сети и оптимизации ее работы.

Нейросетевой алгоритм управления СВКВ с переменным расходом воздуха учитывает направленность и интенсивность изменения параметров температурно-влажностного режима и чистоты воздуха в СС, позволяет сформировать управляющие воздействия, обеспечивающие энергоэффективные режимы работы СВКВ с учетом фактической нагрузки.

Использование интеллектуального регулятора при адаптивном управлении СВКВ с обратной связью позволяет сформулировать концепцию построения интеллектуальной адаптивной СВКВ, которая сможет обеспечить поддержание в сооружениях комфортных условий по температуре, влажности, чистоте воздуха с учетом фактической нагрузки. Концепция построения интеллектуальной адаптивной СВКВ – это подход к разработке, основанный на применении методов искусственного интеллекта для создания СВКВ, способной автоматически адаптировать параметры работы в зависимости от фактической нагрузки и условий эксплуатации. Концепция включает разработку интеллектуального регулятора для поддержания оптимальных условий микроклимата, повышения энергоэффективности и снижения эксплуатационных затрат.

Блок-схема концепции построения интеллектуального адаптивного управления СВКВ представлена на рис. 4.

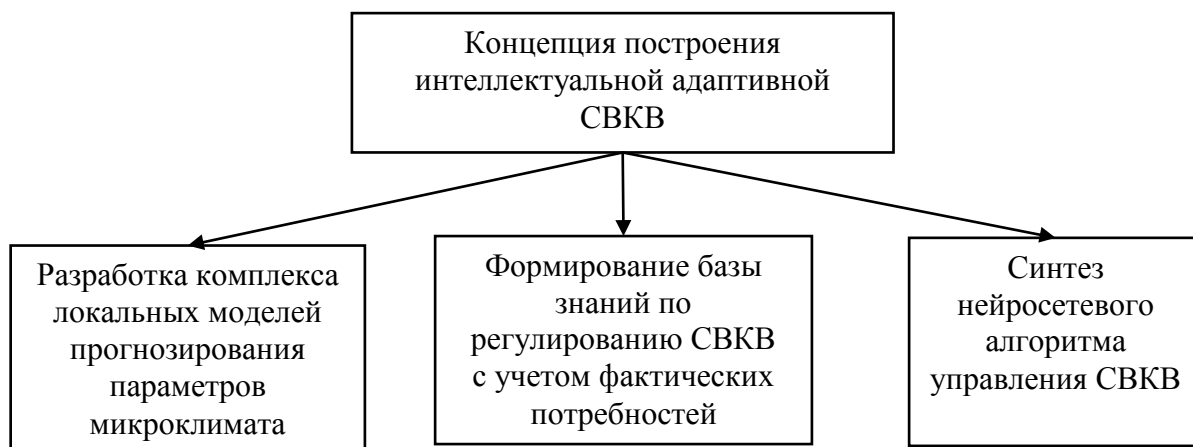


Рис. 4. Блок-схема концепции построения интеллектуальной адаптивной СВКВ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен вопрос применения интеллектуальных методов управления СВКВ сооружений для повышения их энергоэффективности. С этой целью предложен интеллектуальный регулятор.

Реализация предложенной концепции построения интеллектуальной адаптивной СВКВ позволит разработать такие алгоритмы управления, которые обеспечат автоматическую адаптацию параметров работы СВКВ при изменении внешних и внутренних условий функционирования, когда в СС поддерживаются комфортные условия по температуре, влажности и чистоте воздуха по потребности. При этом регулирование СВКВ сооружений по потребности (по фактической нагрузке) позволит повысить их энергоэффективность на 25–30%.

### Список используемых источников

1. Определение порядка сбора данных, алгоритма их обработки и вычисления показателей надежности специальных технических систем космического комплекса : отчет о НИР. – Л. : ВИКИ, 1991. – 185 с.
2. Интеллектуальные методы управления в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / Д. А. Благодаров [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 1–4.
3. Андрийчук В. Н., Соколов В. И., Андрийчук Н. Д. Управление системами отопления, вентиляции и кондиционирования на основе MPC-подхода // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. – 2022. – Вып. 2022-5(157). – С. 5–13.
4. Rehr J., Schwingshackl D., Horn M. Model predictive control of temperature and humidity in heating, ventilating and air conditioning systems // 26<sup>th</sup> Conference on system modeling and optimization (CSMO), Sep. 2013. – Klagenfurt, Austria, 2013. – P. 285–295.
5. Звенигородский И. И., Зырянов Ю. Т., Ульшин Д. И. Использование нейросетевых регуляторов для повышения энергоэффективности и качества системы вентиляции и кондиционирования воздуха заглубленного сооружения // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 1. – С. 99–105.
6. Мозохин А. Е. Методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 6, № 20. – С. 1418–1447.

А. В. Антропова;  
В. В. Козлов,  
*доктор технических наук, профессор;*  
С. Ф. Стельмах,  
*кандидат военных наук*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Представлены основные положения математической дискретной модели механических элементов электро-механических приводов обеспечивающих систем малых космических аппаратов, позволяющей рассмотреть и детально описать условия, при которых возможен незапланированный переход в состояние, отличное от рабочего. На основании этого детального описания возможно принятие решения, которое необходимо для управления электромеханическими приводами обеспечивающих систем малых космических аппаратов, находящимися в нештатных состояниях.

Ключевые слова: электромеханический привод, малый космический аппарат, моделирование, механизм.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Моделирование рабочих процессов, протекающих в действующих электромеханических приводах обеспечивающих систем малых космических аппаратов (ЭМП ОС МКА), необходимо для изучения возможного возникновения и незапланированного течения нештатных ситуаций, связанных с неизбежной деградацией механизмов. Это позволит сформулировать проблему и принять правильное решение для дальнейшего управления приводами, находящимися в состояниях реальной эксплуатации. Для того, чтобы математическое описание было наиболее полным, необходимо рассмотреть непосредственно сам ЭМП, его компоненты, а также элементы, которые составляют компоненты ЭМП. Рассматривать их необходимо как формальные объекты. Они будут иметь определенное количество конкретных состояний. Потоки энергии, которыми обмениваются рассматриваемые объекты, изменяют свои свойства, что может быть описано в виде числовых кодов.

Для того чтобы рассматриваемый комплекс моделей был наиболее полным, но должен включать в себя модель рабочих процессов элементов привода, модели их структуры, модели операций, модели рабочих процессов в виде деревьев функционирования. В статье рассмотрены механизмы приводов обеспечивающих систем малых космических аппаратов.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЯМ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

В условиях постоянного наращивания орбитальной группировки необходимо сосредоточиться на исследовании процессов, протекающих в системах, установленных на борту космического аппарата. Это поможет добиться улучшения эксплуатационных характеристик и увеличит время бесперебойной работы оборудования, обеспечит выполнение поставленных задач.

Как и любой космический аппарат, МКА состоит в основном из силовой конструкции, на которой размещены целевые системы и обеспечивающие системы. Важнейшей задачей для



успешной эксплуатации МКА является обеспечение их работоспособности в условиях космического полета.

Еще на стадии проектирования разработчики оборудования могут спрогнозировать возможное снижение эксплуатационных характеристик, возникающее в следствие физико-химических процессов «старения», неизбежно протекающих в конструкционных материалах, вызывающих износ деталей. Все эти процессы становятся наиболее вероятными при длительной эксплуатации. Необходимо учитывать и возникновение внезапных незапланированных разрушений деталей и конструкций. Они могут быть обусловлены появляющимися нагрузками из-за накопления повреждений, которые невозможно предсказать. Следует отметить, что доля постепенных отказов в оборудовании МКА в среднем составляет 50%, а для механического оборудования ОС составляет 80–90%.

Актуальность проведения работ по обеспечению работоспособности МКА проявляется в том, что функционирование МКА проходит в условиях воздействия деградиционных факторов и деградиционных процессов, характерных для космического полета.

Исходя из этого, в статье сделан уклон на исследование именно механической части приводов ОС (рис. 1).

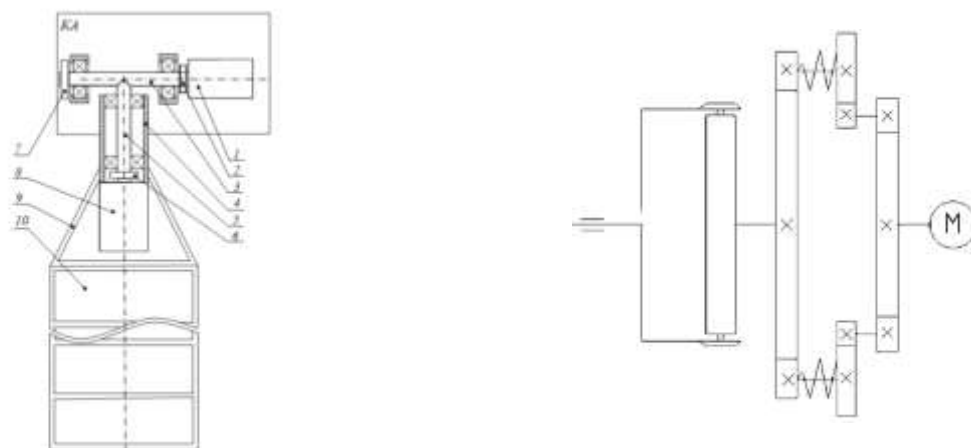


Рис. 1. ЭМП ОС МКА:

- 1, 8 – мотор-редуктор; 2 – муфта; 3 – приводной вал ориентации по крену; 4 – гильза;  
5 – приводной вал ориентации по тангажу; 6 – муфта; 7 – фрикционный тормоз;  
9 – рама; 10 – панели солнечных батарей

## МОДЕЛИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рабочие процессы компонентов ЭМП ОС МКА заключаются в выполнении последовательности операций, которая определяется заданным алгоритмом управления. А именно, по заданному алгоритму происходит изменение состояния компонента, что находит отражение в смене параметров потока энергии и потока информации.

Непосредственно математическое описание рабочих процессов компонента ЭМП заключается в определении условий, которые и обуславливают переход выбранного компонента из одного состояния в другое. В качестве исходных данных, необходимых для математического описания, рассматривается множество операций компонента  $S_k = \{s_i\}_i^*$  и описание состояний элементов  $v_i \in V_k = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_i^*\}$  компонента в каждом из них.

Выявление условий перехода позволяет сформировать математическую модель функционирования компонента ЭМП ОС МКА в виде графа  $G_{ПК}(S_k, Y_k)$ , состоящего из вершин  $S_k$  и дуг  $Y_k$ , который предназначен для описания переходов между состояниями [2–6]. Такие переходы можно использовать в виде команд управления работой элементов.

Описание работы привода с помощью теории графов позволяет разработать алгоритм его работы. Графу  $G_{ПК}(S_k, Y_k)$  может быть поставлена в соответствие матрица переходов  $M_{ПК}$ .

Фрагменты графа  $G_{ПК}(S_k, Y_k)$  и матрицы  $M_{ПК}$  представлены на рис. 2 и 3.

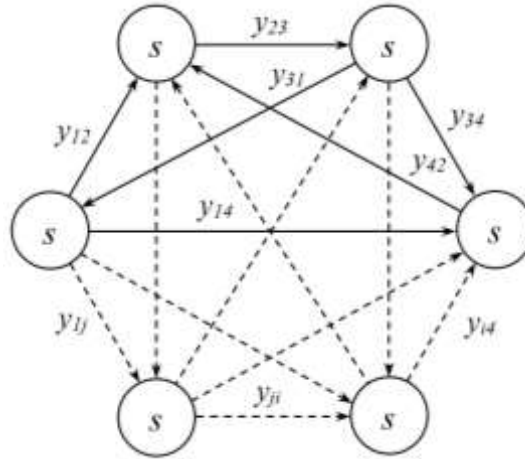


Рис. 2. Фрагмент диаграммы графа перехода компонента  $G_{ПК}(S_k, Y_k)$

	$s_1$	$s_2$	...	$s_i$
$s_1$		$y_{12}$	...	$y_{1i}$
$s_2$	$\emptyset$		...	$y_{2i}$
...	...	...	...	...
$s_i$	$\emptyset$	$y_{j2}$	...	

Рис. 3. Фрагмент матрицы перехода компонента  $M_{ПК}$

Последовательность переходов и определяет функционирование компонента ЭМП, которое описывается моделями алгоритмов функционирования  $A_s$  и алгоритмов управления  $A_y$ . Источниками информации, по которым формируются данные алгоритмы, являются граф  $G_{ПК}(S_k, Y_k)$  и матрица  $M_{ПК}$ . Модели алгоритмов  $A_s$  можно представить в виде пути  $l_{ij}^{(s)}$ , проходящего через вершины  $s_i$  и  $s_j$ . Алгоритм управления  $A_y$  может быть представлен также в виде пути  $l_{ij}^{(y)}$ , проходящего через вершины  $s_i$  и  $s_j$ , и записывается как последовательность дуг (команд управления)  $y_{ij} \in Y$ .

Учитывая, что смысл функционирования компонента ЭМП заключается в управлении состоянием потоков энергии, можно сказать, что модель функционирования отражает условия смены состояний потоков энергии в пространстве  $Z$ .

При таком подходе работа компонентов привода может быть представлена в виде соединения управляющей системы (УС) ( $S, Y, F$ ) и объекта управления (ОУ) ( $Z, S, \Psi$ ), где  $F$  – оператор переходов УС;  $Z$  – непустое конечное множество состояний ОУ;  $\Psi$  – оператор переходов ОУ, позволяющий отследить переходы УС в состояние  $s_i$  (т. е. граф или матрица переходов ОУ), что показано на рис. 4. При этом выходной алфавит первого автомата (УС) определяет входной алфавит второго автомата (ОУ).

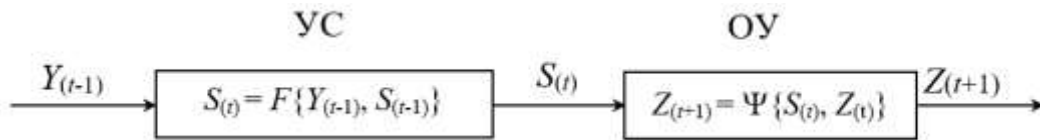


Рис. 4. Автоматная модель функционирования компонента ЭМП

Алгоритмы функционирования автоматов  $A_s^{УС}$  и  $A_s^{ОУ}$  можно представить в виде следующих соотношений:

$$l_{ij}^{(sy)} = s_1 \cdot y_{12} \cdot \dots \cdot s_i \cdot y_{im} \cdot \dots \cdot y_{kj} \cdot s_j \tag{1}$$

$$l_{ij}^{(zs)} = z_1 \cdot s_{12} \cdot \dots \cdot z_i \cdot s_{im} \cdot \dots \cdot s_{kj} \cdot z_j \tag{2}$$

Соотношения (1) и (2) дают возможность перейти к модели работы привода в виде графа древовидной структуры, где корень дерева соответствует исходному состоянию, а вершины соответствуют «рабочим» состояниям. Тупиковые («висячие») вершины определяют состояния, в которых завершается функционирование компонента ЭМП. В качестве примера на рис. 5 представлен фрагмент дерева функционирования.



Рис. 5. Фрагмент дерева функционирования компонента ЭМП

Представленные модели функционирования компонента описаны в предположении о безотказности элементов, что является идеальной ситуацией. В ходе длительной летной эксплуатации неизбежными становятся ситуации, когда в процессе перехода компонента ЭМП от одной операции к другой, его элементы переходят в нештатные состояния, а, следовательно, в нештатное состояние переходит и сам компонент. Возникает необходимость в создании алгоритма управления, направленного на вывод устройства в рабочее состояние. В некоторых случаях, когда произошло значительное отклонение от штатного функционирования, алгоритм управления должен перевести устройство в выключенное состояние. Для создания таких алгоритмов управления необходимо определить полный перечень возможных нештатных состояний и причин, которые вызвали переход.

Модель, описывающая непрерывную работу компонента в штатном и нештатном режимах, представлена на рис. 6. Такая модель является ключевой для понимания процессов перехода компонента в нештатное состояние.

Модель образована графом древовидной структуры (рис. 5) в виде последовательности перехода  $T_{ПК}(S_k, Y_k, T)$  в режиме штатной работы. В качестве корневой вершины будем считать исходное состояние  $s_0^{шт}$  компонента ЭМП. При таком подходе безотказное выполнение описывается в виде пути  $L_{ПК}(S_k^{шт}, Y_k^{шт}, T)$  в графе штатного функционирования.

Для описания отклонений от штатной работы производится ветвление ствола дерева в каждом  $i$ -м такте функционирования. Из каждого  $s_{i-1}^{\text{шт}}$  штатного состояния компонента становится возможным записать множество нештатных переходов в виде следующего соотношения:

$$Y_i^{\text{НШТ}} = \{y_{in}\}_{n^*},$$

где  $n^*$  – число нештатных переходов.

Данный процесс можно представить в виде графа нештатного функционирования (рис. 6.).

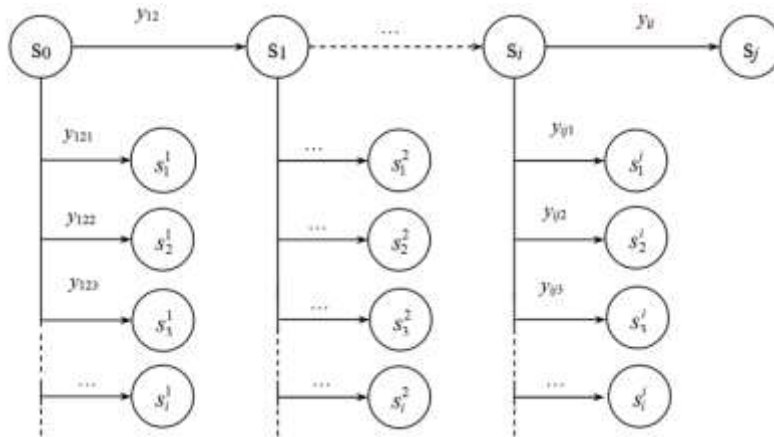


Рис. 6. Дерево нештатного функционирования компонента ЭМП

Число нештатных переходов в каждом такте функционирования зависит от выбранной глубины анализа, а их описание не имеет принципиальных ограничений по учету возможных нештатных срабатываний элементов, ошибок управления, влияния внешних факторов, т. е. позволяет учесть и формализовать отмеченные причины перехода компонента в нештатные состояния.

## МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ АГРЕГАТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Особенностью работы ЭМП ОС МКА является физическая разнородность составляющих его компонентов. Каждый компонент рассматривается как «суперэлемент» состоящий из отдельных элементов. Структура сложного объекта определяется различной физической природой компонентов ее составляющих и связи между ними. Такому подходу к составлению модели структуры соответствует представление в виде графов.

В результате, модель структуры привода может быть представлена в виде гиперграфа  $H(W, E)$  с множеством вершин  $W = \{w_k\}_{k^*} = \{G_k(V_k, X_k)\}$  и множеством ребер  $E = \{e_n\}_{n^*} = \{V_k \times V_l\}$ . Под гиперграфом (иерархическим графом) понимается граф, вершины которого сами являются графами.

Дисковый электромагнитный тормоз будет общим элементом для пары компонентов, механической частью входящий в модель  $V_1$  механических конструкций, а электромагнитной частью – в модель  $V_2$  электрической системы. Таким образом, дисковый электромагнитный тормоз является элементом множества  $(V_1 \times V_2)$ .

Гиперграф  $H(W, E)$ , также как и граф  $G_k(V_k, X_k)$  структуры компонента, отображается диаграммой (рис. 7), матрицей смежности и инцидентности и т. д.

Для различения видов связей (компоновочных, конструкционных, функциональных) между компонентами в гиперграфе применяется окраска ребер.

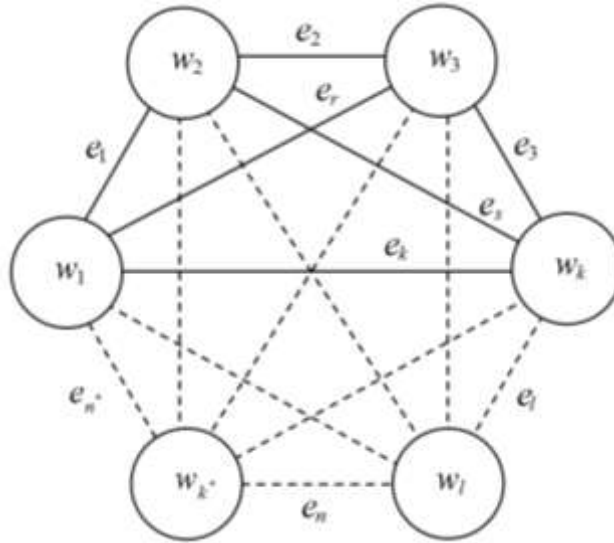


Рис. 7. Модель структуры агрегата в виде диаграммы  $H(W, E)$

Модель структуры ЭМП можно также представить графом  $G_A(V_A, X_A)$ , который формируется путем агрегирования графов  $G_k(V_k, X_k)$  структур его компонентов [1], выраженных матрицами связей  $A_{[i_k^*]}$  последних:

$$G_A(V_A, X_A) = \bigcup_{k=1}^{k^*} G_k(V_k, X_k). \tag{3}$$

Вершины графа  $G_A(V_A, X_A)$ , определенные на пересечении множеств вершин графов  $G_k(V_k, X_k)$  структур компонентов, т. е.

$$V_A = V_l \cap V_k,$$

где  $V_l, V_k$  – множества вершин  $l$ -го и  $k$ -го компонента ЭМП, являются ребрами гиперграфа  $H(W, E)$ .

Таким образом, гиперграф отображается матрицей  $A_{[k^*(i^*)]}$  связей (рис. 8), где  $k^*$  – число компонентов ЭМП;  $i_k^*$  – число вершин графа структуры  $k$ -го компонента,  $i^* = \sum_{k=1}^{k^*} i_k^*$ , элементы  $a_{mm}$  которого описывают компоненты ЭМП как суперэлементы и представляют собой матрицы связей  $A_{[i_k^*]}$  графов  $G_k(V_k, X_k)$  структур компонентов, а элементы  $a_{ml}$  являются вершинами графа  $G_A(V_A, X_A)$ .

Элементы  $a_{ml}$  определяются в виде следующего соотношения:

$$a_{ml} = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } v_{mq} \text{ графа } G_m(V_m, X_m) \text{ и вершина } v_{lp} \text{ графа } G_l(V_l, X_l) \\ & \text{описывают один и тот же элемент;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$



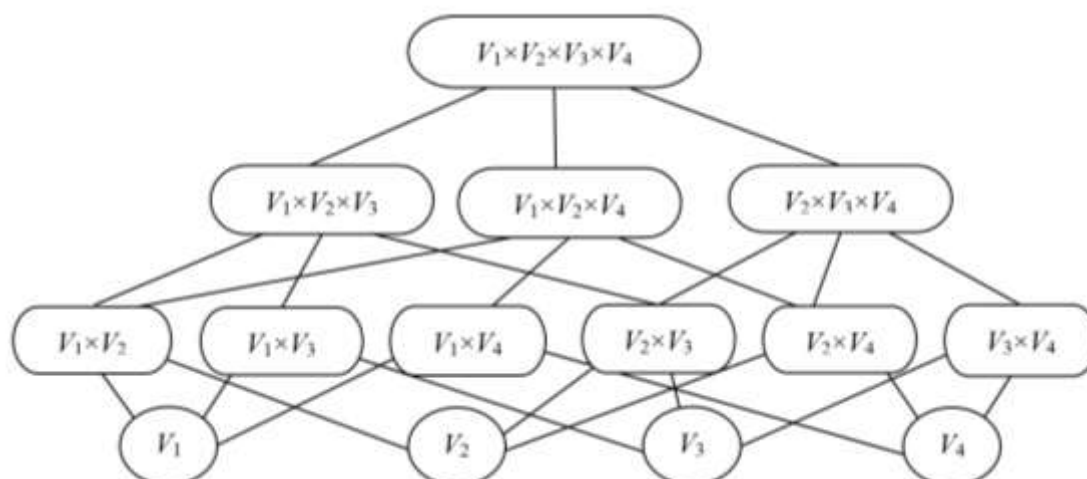


Рис. 9. Иерархический граф структуры агрегата ЭМП

Таким образом, описание структуры ЭМП ОС МКА как динамического объекта осуществляется динамическим иерархическим графом. Поскольку модели реальных ЭМП ОС МКА имеют большую размерность, то подход, основанный на прямом их переборе, является бесперспективным. Поэтому реальное использование моделей структур ЭМП для анализа их функционирования в состояниях реальной эксплуатации возможно лишь при моделировании структуры привода в конкретных состояниях. В статье это достигается именно введением динамического иерархического графа структуры, состав вершин и ребер которого для каждого такта функционирования привода определяется участвующими в нем компонентами.

### МОДЕЛЬ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

ЭМП ОС МКА – динамически взаимодействующая в процессе функционирования совокупность компонентов, взаимосвязанных функционально. Результатом влияния компонентом будет их взаимодействие друг на друга. Поскольку каждый из компонентов ЭМП ОС МКА выполняет конкретную функцию (контроль, формирование управляющих воздействий, обеспечение, воздействие), то для достижения целей функционирования логическая связь условий выполнения приводом определенной операции записывается следующим образом:

$$F(S_i) = \bigwedge_{k=1}^{k^*} F_k(S_i), \quad (4)$$

где  $F(S_i)$  – логическая функция выполнения ЭМП ОС МКА заданных функций с учетом определенных требований к взаимодействию функционально взаимосвязанных компонентов;

$F_k(S_i)$  – логическая функция, отображающая функционирование  $k$ -го компонента ЭМП ОС МКА и принимающая в общем случае следующие значения:

$$F_k(S_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-я компонента ЭМП ОС МКА,} \\ & \text{имея возможности (средства), выполняет} \\ & \text{возложенную на нее функцию (контроль,} \\ & \text{формирование управляющих воздействий,} \\ & \text{обеспечение, воздействие);} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Каждый член в правой части формулы (4) отражает функционирование соответствующих компонентов ЭМП ОС МКА, а их значения, как значения логических переменных, соответствуют определенным состояниям последних.

Для учета взаимодействия функционально связанных компонентов и описания операций ЭМП ОС МКА рассмотрим последовательность кодовых значений операций компонентов привода:

$$\langle r_{1p}, r_{2s}, \dots, r_{ki}, \dots, r_{k^*q} \rangle.$$

Здесь  $k^*$  – число компонентов ЭМП ОС МКА;

$r_{ki}$  – кодовое значение  $i$ -й операции  $k$ -го компонента привода,

$$r_{ki} \in R_k = \{r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{ki^*}\},$$

где  $i^*$  – число операций  $k$ -го компонента привода;

$k$  – порядковый номер компонента привода.

Множество последовательностей кодовых значений операций компонентов ЭМП ОС МКА определяется в соответствии со структурно-функциональными взаимосвязями компонентов, определенными в модели структуры привода (динамический иерархический граф).

## МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРЕГАТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Функционирование ЭМП ОС МКА заключается в совместном функционировании составляющих его компонентов по алгоритму, описанному в [11–13].

Работа физически разнородных компонентов должна быть представлена в виде единых моделей. Такие модели должны представлять собой графы перехода каждого компонента для конкретного алгоритма его функционирования, представленного в виде деревьев функционирования. Таким образом, математическое описание функционирования ЭМП ОС МКА основано на использовании моделей функционирования его компонентов. Формирование модели функционирования привода производится путем агрегирования частных моделей функционирования его компонентов и формально сводится к задаче определения и описания множества возможных состояний привода в каждом такте функционирования основной системы. В силу особенностей структурно-функциональной взаимосвязи компонентов ЭМП ОС МКА модель рабочих процессов может быть представлена в виде ациклического графа  $T_{ПА}(S_A, Y_A, T)$  перехода привода и в теоретико-множественном представлении определяется как прямое произведение графов переходов  $T_{ПК}(S_k, Y_k, T)$  отдельных его компонентов:

$$T_{ПА}(S_A, Y_A, T) = \prod_{k=1}^{k^*} T_{ПК}(S_k, Y_k, T).$$

За основу модели функционирования привода берется модель функционирования целевой системы (например, редукторной системы).

Ствол графа  $T_{ПК}(S_k, Y_k, T)$  описывает штатное функционирование ОС МКА и отображается путем  $L_{ПК}(S_K^{шт}, Y_K^{шт}, T)$ , описанным в формулах (1) и (2). При этом вершины пути  $L_{П}(S_K^{шт}, Y_K^{шт}, T)$  описывают операции (состояния) компоненты привода при безотказной работе.

В случае появления отказов моделирование производится по аналогии с моделями, аналогичными моделям функционирования компонентов привода (см. рис. 5). Из каждого штатно-



го состояния  $S_{комп i}^{шт}$  компонента привода формируется множество возможных нештатных переходов  $Y_{ik}^-$ , характеризующих нештатное функционирование участвующих в каждом конкретном такте работы функциональных элементов основной системы. Фрагмент дерева нештатного функционирования привода представлен на рис. 10.

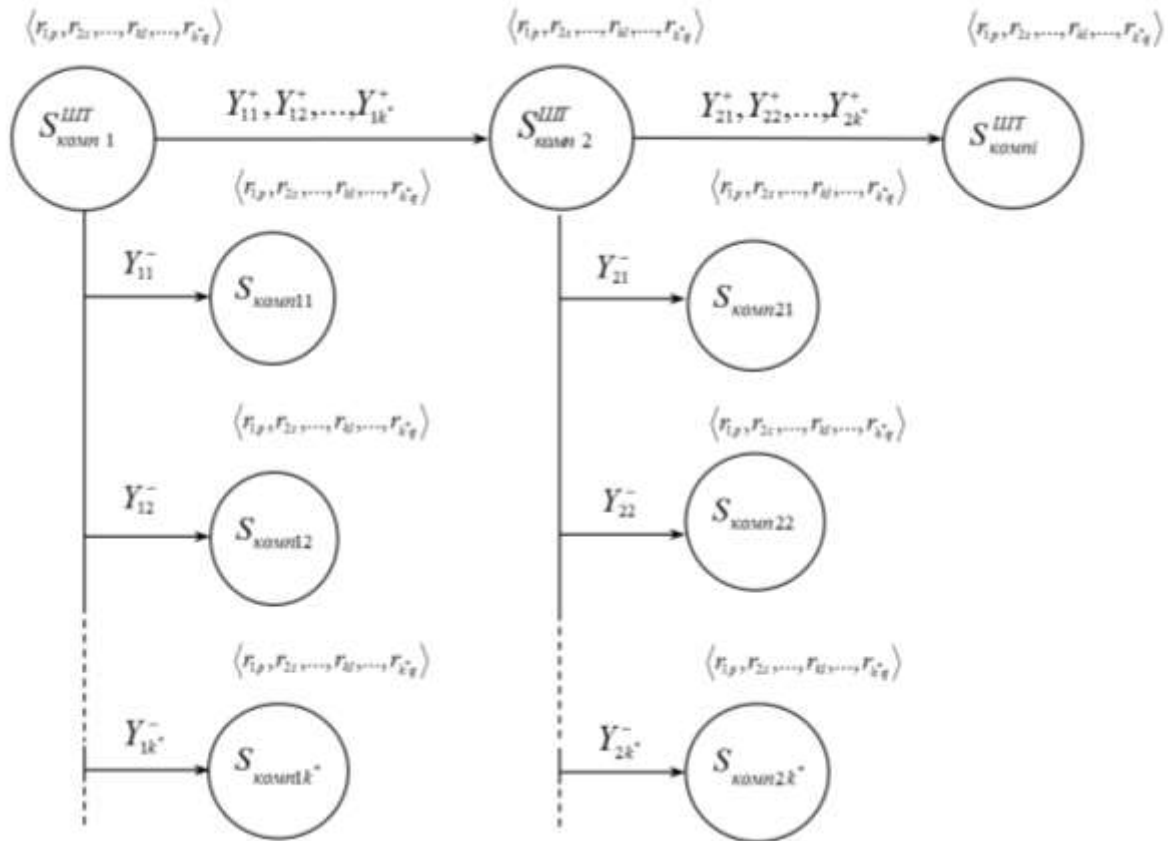


Рис. 10. Дерево нештатного функционирования привода

Таким образом, в силу особенностей структурно-функционального построения ЭМП ОС МКА, множество  $S_{комп} = \{S_{комп i}\}_i$  состояний (операций) привода, в общем случае, можно рассматривать как совокупность несовместных подмножеств состояний (операций):

$$S_{ЭМП} = S_{ЭМП^*} \cup S_{ЭМП^{**}};$$

$$S_{ЭМП^*} \cap S_{ЭМП^{**}} = \emptyset,$$

где  $S_{ЭМП^*}$  – подмножество штатных состояний;  
 $S_{ЭМП^{**}}$  – подмножество нештатных состояний.

Рассмотрение перехода ЭМП ОС МКА в нештатное состояние, определяемого формально как результат перехода в нештатное состояние функциональных элементов его основной системы, проводится в соответствии со структурно-функциональными связями между элементами операционной системы, определенными в модели связей элементов операционной системы по моделям появления нештатных состояний соответствующих элементов операционной системы на конкретном такте функционирования основной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное в статье математическое моделирование рабочих процессов ЭМП ОС МКА основано на дискретных моделях рабочих процессов компонентов привода. Рассмотрение моделей компонентов привода дает возможность проанализировать все возможные состояния, в которых может находиться привод, в том числе нештатные. Наличие такой информации позволяет принимать необходимые решения для воздействия на компоненты привода, которые находятся в определенных состояниях, обеспечить выход из нештатного состояния. Таким образом происходит регулирование работы привода в целом, что обеспечивает его бесперебойную работу.

## Список используемых источников

1. Козлов В. В., Антропова А. В., Стельмах С. Ф. Модели структур компонентов электромеханических приводов обеспечивающих систем малых космических аппаратов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 684. – С. 147–158.
2. Прокопенко Н. Ю. Дискретная математика : учеб. пособие. – Н. Новгород. : ННГАСУ, 2016. – 251 с.
3. Моисил Гр. К. Алгебраическая теория дискретных систем. – М. : Мир, 1967. – 260 с.
4. Мак-Нотон Р. Теорема о бесконечнозначной логике высказываний // Кибернетический сборник. – 1961. – № 3. – С. 3–7.
5. Потапов Д. К. Неклассическая логика : учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ, 2006. – 108 с.
6. Исследование логических систем / ответ. ред. П. В. Таванец. – М. : Наука, 1970. – 283 с.
7. Бабичева И. В., Болдовская Т. Е. Справочник по математика : учеб. пособие. – Омск : СибАДИ, 2010. – 148 с.
8. Арайс Е. А., Дмитриев В. М. Автоматизация моделирования многосвязных механических систем. – М. : Машиностроение, 1987. – 306 с.
9. Булева алгебра и конечные автоматы : пер. с франц. / под ред. П. П. Пархоменко. – М. : Мир, 1969. – 253 с.
10. Сачков В. Н. Введение в комбинаторные методы дискретной математики. – М. : Наука, 1982. – 310 с.
11. Алексеев В. Е., Захарова Д. В. Теория графов : учеб. пособие. – Н. Новгород. – Нижегородский ун-т, 2017. – 119 с.
12. Кулик В. Г. Алгоритмизация производственных процессов. – М. : Энергия, 1971. – 123 с.
13. Донской А. С. Основы пневмоавтоматики : учеб. пособие. – СПб. : Изд-во Политехнического ун-та, 2016. – 77 с.

И. В. Апевалов;  
 П. С. Гончаров,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
 Л. П. Зозуля,  
*кандидат технических наук;*  
 А. Л. Копейка,  
*кандидат технических наук*

## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТЯГИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ

Представлен способ, который позволяет измерять силу тяги электрического ракетного двигателя (ЭРД). Способ основан на проведении измерений с использованием подвесной маятниковой конструкции, в состав которой входит вакуумная камера с приборным отсеком. Испытания происходят в условиях, близких к реальным условиям работы ЭРД. Способ заключается в определении силы тяги ЭРД за счет измерения в барокамере перемещения до состояния равновесия центра масс ЭРД под действием сил. Обработка данных для определения силы тяги в установившемся режиме проведена с учетом погрешностей.

Ключевые слова: электрический ракетный двигатель, сила тяги, подвесная маятниковая конструкция, вакуумная камера.

### ВВЕДЕНИЕ

При разработке ЭРД различного типа одной из важных характеристик является величина силы тяги ЭРД. Измерение силы тяги является одним из наиболее фундаментальных задач при измерении характеристик двигателя. В последнее время повышенное внимание уделяется малым ЭРД, которые производят относительно низкие силы тяги. Измерение силы тяги таких ЭРД затруднительно. Кроме того, что сила тяги мала, возникает еще и сложность ввиду того, что объект испытаний находится в труднодоступном месте в особой рабочей среде. Тягу таких двигателей обычно определяют с помощью маятниковых измерительных стендов. Существуют три основных конфигурации измерительных стендов, используемых для проведения измерений силы тяги в установившемся режиме:

- подвесные;
- перевернутые;
- крутильные.

Виды конфигураций измерительных стендов представлены на рис. 1.

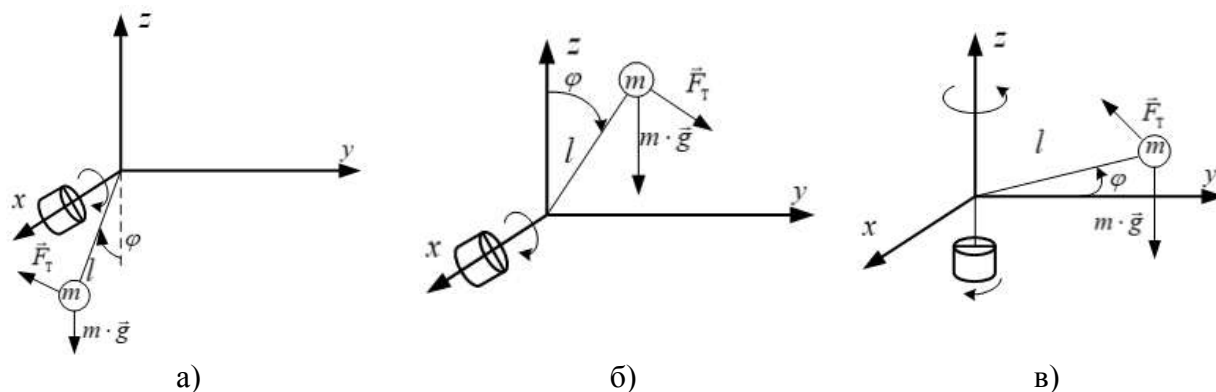


Рис. 1. Виды конфигураций измерительных стендов:  
 а – подвесные; б – перевернутые; в – крутильные

Основное отличие между тремя типами измерительных стендов заключается во влиянии силы тяжести на динамику движения. Гравитация действует следующим образом:

- а) как возвращающая сила в подвесных маятниках;
- б) как сила, стремящаяся увеличить отклонение в перевернутых маятниках;
- в) как сила, не оказывающая никакого влияния на крутильные маятники, у которых плоскость движения перпендикулярна ее вектору тяги.

Подвесные маятниковые стенды, как правило, проще всего реализовать, при этом, в силу того что такие стенды менее чувствительны к внешним воздействиям, они обеспечивают более высокую точность измерений.

Целью исследований является предоставление сведений по использованию подвесной маятниковой конструкции, которая применяется для получения достоверных результатов измерений силы тяги ЭРД.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Проведение экспериментов происходит с использованием подвесной маятниковой конструкции (ПМК). Она концептуально проста и удобна в использовании, стабильна, поскольку момент силы тяжести всегда возвращает маятник в нулевое положение. Отклонения подвеса, которые позволяет достигать ПМК, соответствуют ожидаемому диапазону силы тяги. Проведение экспериментов происходит с использованием вакуумной установки, в состав которой входит вакуумная камера с приборным отсеком.

На основе проведенного анализа современных технологий автоматизации и моторизированных позиционеров авторским коллективом Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского было разработано и изготовлено устройство измерения перемещения центра масс (УИПЦМ) ЭРД, входящее в состав ПМК. Схема взаимодействия основных составных частей УИПЦМ и ЭРД представлена на рис. 2.

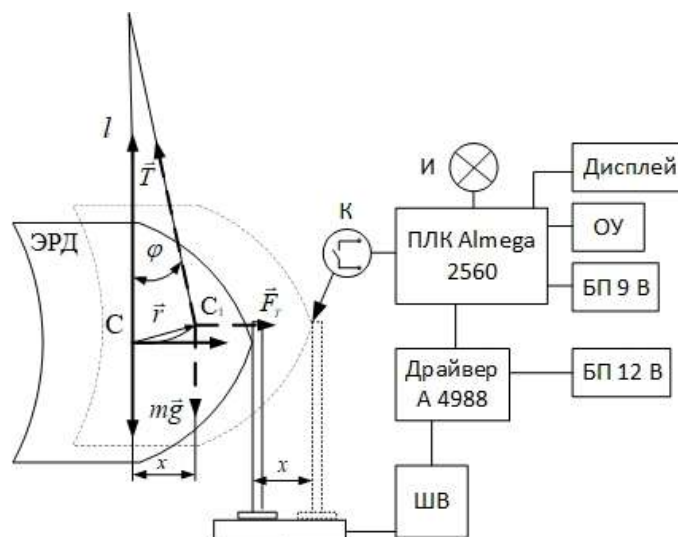


Рис. 2. Схема взаимодействия основных составных частей УИПЦМ и ЭРД

В состав УИПЦМ ЭРД входят:

- столик с одним микрометрическим перемещением;
- шаговый двигатель (ШД) 17HS4401 с зубчатым ремнем;
- кабельная сеть;
- цифровой блок управления (ПЛК – программируемый логический контроллер) с блоком питания (БП 9В) и органы управления (ОУ);

– источник постоянного напряжения (БП 12В) для питания ШД.

В качестве чувствительного элемента (ЧЭ) в УИПЦМ выступает контактор  $K$ , о замыкании и размыкании которого оповещает индикатор  $I$ . ЧЭ размещается на плоской плате, которая соединена с перемещаемым столиком. Столик, изображенный на рис. 3, имеет одно микрометрическое перемещение с точностью отсчета  $10^{-3}$  м.

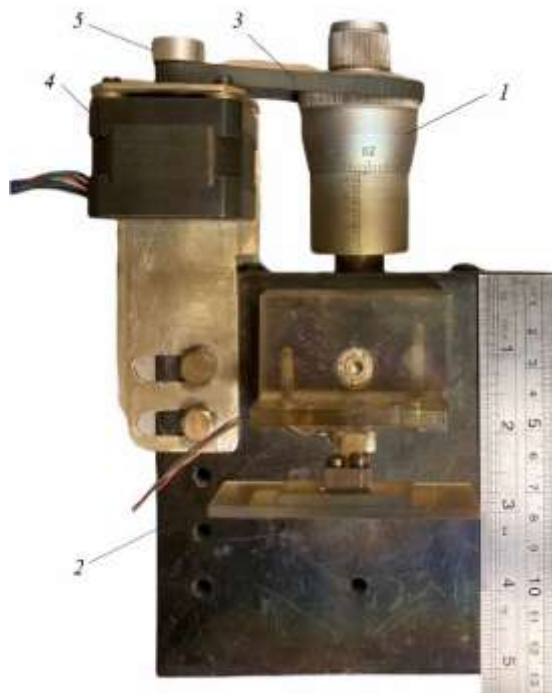


Рис. 3. Универсальный столик с микрометрическим перемещением:  
1 – микрометрический винт; 2 – столик; 3 – зубчатый ремень;  
4 – ШД 17HS4401; 5 – шкив

На валу ШД установлен шкив, диаметром  $d_2$ , с зубчатым ремнем. Через зубчатый ремень вращение шкива передается на микровинт  $d_1$  столика.

Продольное перемещение столика обеспечивается за счет механизма с двумя винтовыми парами (рис. 4). В данном механизме одна кинематическая пара вращательная, а две других поступательные. При повороте винта 1 на полный оборот  $2\pi$  происходит его перемещение относительно стойки на величину  $P_{n13}$ , а в винтовой паре 1–2 – относительное перемещение на величину  $P_{n12}$ .

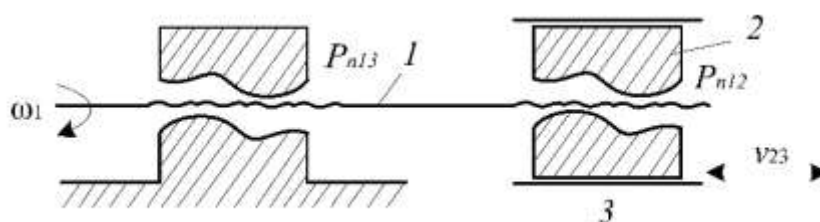


Рис. 4. Механизм с двумя винтовыми парами

Вращательное движение от двигателя на микровинт передается с помощью зубчатого ремня (рис. 5).

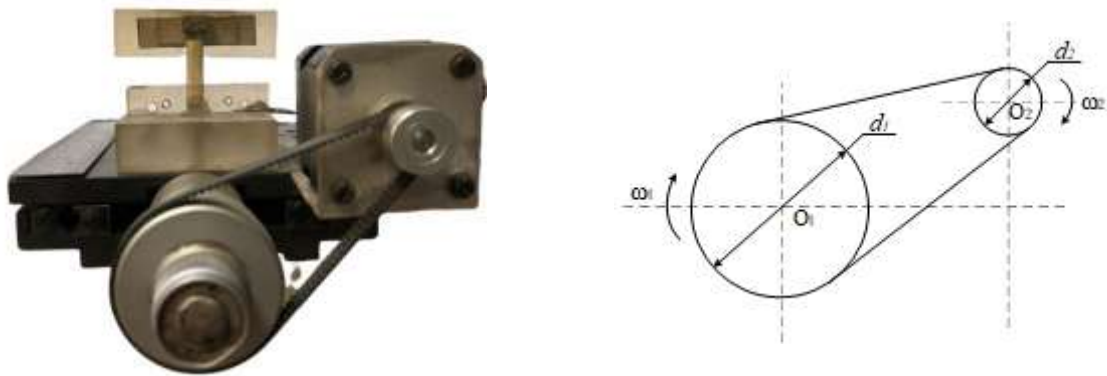


Рис. 5. Передача вращательного движения на микровинт

С учетом того, что

$$L = \alpha \cdot \frac{d}{2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол, на который совершается оборот;  
 $L$  – длина окружности;  
 $d$  – диаметр вала;

при передаче вращательного движения на микровинт справедливо соотношение

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_2 \cdot d_2}{d_1}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – угол поворота на микровинте;  
 $\alpha_2$  – угол поворота на шкиве ШД;  
 $d_1$  – диаметр микровинта;  
 $d_2$  – диаметр шкива ШД.

Перемещения  $x_1$  и  $x_2$ , совершенные звеньями  $P_{n12}$  и  $P_{n13}$ , соответственно равны

$$x_1 = \frac{\alpha_1 \cdot P_{n12}}{2 \cdot \pi} \text{ и } x_2 = \frac{\alpha_2 \cdot P_{n13}}{2 \cdot \pi}. \quad (3)$$

Общее перемещение звена 2 (см. рис. 4) относительно стойки 3 зависит от направления резьбы винтовых пар. Поскольку резьба в винтовых парах разного направления, следовательно, общее перемещение за один ход будет представлять собой сумму двух перемещений  $P_{n13} + P_{n12}$ . Таким образом, с учетом (2) и (3), общее перемещение за один шаг составит

$$\lambda = x_1 + x_2 = \frac{\alpha_2 \cdot d_2}{2 \cdot \pi \cdot d_1} \cdot (P_{n13} + P_{n12}), \quad (4)$$

где  $P_{n12} + P_{n13}$  – ход винтовой пары.

Информация о количестве сделанных шагов ШД и перемещении, которое совершает ЧЭ, отображается на дисплее. Перемещение  $x$ , которое совершает ЧЭ с учетом выражения (4) и шагов ШД, рассчитывается по формуле

$$x = n \cdot \lambda, \quad (5)$$

где  $n$  – количество шагов ШД;

Электропитание и управление ШД [3, 4] осуществляется через кабельную сеть устройства, которая выводится из приборного отсека через гермоввод. Гермоввод также предназначен для обеспечения ввода/вывода электрических сигналов и питающих напряжений для ЧЭ технологических и контрольно-измерительных устройств и приборов.

## СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА И УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ И РАВНОВЕСИЯ

Испытания проводятся в условиях, близких к реальным условиям работы ЭРД. Сама процедура определения силы тяги достаточно тривиальна и включает в себя [5]:

- подвешивание ЭРД на нерастяжимой нити;
- подключение регистрирующей аппаратуры;
- запуск ЭРД и регистрацию воздействий.

Процедура определения силы тяги выполняется при следующих основных допущениях:

- точка регистрации касания ЭРД и измерительный стенд (ИС) находятся на одной оси с центром масс ДУ;
- вибрации ЭРД отсутствуют;
- ЭРД подвешен на тонкой невесомой нерастяжимой нити с помощью шарниров, расположенных в точке подвеса и в центре масс.

В положении равновесия на ЭРД действует три силы (рис. 6):

- сила натяжения нити  $\vec{T}$ ;
- сила тяги  $\vec{F}_T$ ;
- сила тяжести  $m\vec{g}$ .

Реакция нерастяжимой нити, сила тяги и сила тяжести пересекаются в одной точке, совпадающей с центром масс. Между ЭРД и измерительным стендом обеспечивается электрическая развязка. Способ заключается в определении силы тяги ЭРД за счет измерения в барокамере перемещения до состояния равновесия центра масс ЭРД под действием трех сил. При включении ДУ подвешенный на нерастяжимой нити ЭРД начинает движение по окружности, радиус которой равен длине нити  $l$ . Для определения силы  $\vec{F}_T$  тяги ДУ можно воспользоваться теоремой об изменении кинетической энергии [6]

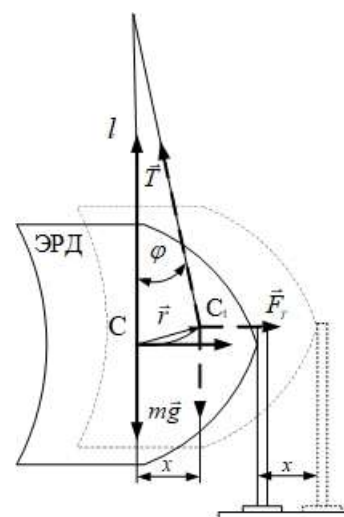


Рис. 6. Схема ЭРД с ИС

$$T - T_0 = F_T \cdot r \cdot \cos \frac{\varphi}{2} - m \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \varphi),$$

- где  $T$  – кинетическая энергия в рассматриваемый момент времени;  
 $T_0$  – кинетическая энергия в начальный момент времени;  
 $\varphi$  – угол отклонения нити;  
 $m$  – масса ЭРД;  
 $r$  – длина хорды  $CC_1$ .  
 $l$  – длина нити.

ДУ начинает движение из состояния покоя, следовательно  $T_0 = 0$ . При максимальном угле отклонения скорость центра масс ДУ будет равна нулю, следовательно  $T = 0$ . Тогда

$$F_T \cdot r \cdot \cos \frac{\varphi}{2} = m \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \varphi_{\max}).$$

Разложив косинус и синус в ряд и проведя преобразования, можно получить выражение для определения силы тяги двигателя:

$$F_T = \frac{m \cdot g \cdot \varphi_{\max}}{2}. \quad (6)$$

Угол  $\varphi_{\max}$  находится через смещение  $x$  ЧЭ.

Прежде чем ЭРД займет положение равновесия, центр масс отклонится на  $\varphi_{\max}$ . Регистрируется горизонтальное смещение  $x$ , соответствующее углу  $\varphi_{\max}$ :

$$\varphi_{\max} = \frac{x}{l}.$$

Лампочка на измерительном стенде загорится при максимальном угле отклонения. ИС имеет возможность перемещения с помощью микроподачи, равной шагу ШД.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обработка данных для измерений тяги в установившемся режиме требует определения погрешностей. Погрешности можно разделить на два класса:

- случайные ошибки;
- систематические ошибки.

Случайные ошибки неизбежны и обычно представляют собой совокупный результат множества факторов, проявление которых невозможно предсказать. Случайные ошибки изменяются при повторении эксперимента. Они подчинены нормальному закону распределения со средним значением, равным нулю.

К источникам случайной погрешности относятся:

- жесткость различных элементов;
- электрический шум, который может значительно усиливаться при работе ЭРД;
- вибрация из окружающей среды и из-за исполнительных механизмов;
- ошибки измерения расстояния от оси вращения и т. д.

Систематические ошибки имеют тенденцию исказить ответ в определенном направлении.

Источники систематических погрешностей включают:

- тепловое смещение;
- трение между компонентами;
- электромагнитные или электростатические силы, возникающие из-за высоких токов и напряжений;
- изменение размеров элементов из-за изменения температур.

Для случайных и систематических ошибок используются разные подходы проверки. Систематическая погрешность может быть определена экспериментально и вычтена из измерения, чтобы получить скорректированный результат, более близкий к истинному значению.

Лучшим, наиболее полным и рациональным критерием точности для случайных погрешностей измерений является средняя квадратичная ошибка.

Пусть в результате  $n$ -кратных измерений силы тяги  $F_T$ , истинное значение которой неизвестно, получен набор горизонтальных смещений  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , где  $x_1$  – результат первого измерения,  $x_2$  – результат второго измерения и т. д. По значениям аргумента, полученным при измерениях, находится среднее арифметическое значение этого аргумента:



$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

Дисперсия случайной величины  $x$  равна среднему значению квадрата отклонения этой величины от ее среднего значения:

$$\sigma_x^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}.$$

Искомое среднее арифметическое значение силы тяги вычисляется по формуле

$$\bar{F}_T = \frac{m \cdot g \cdot \bar{x}}{2 \cdot l}.$$

Средняя квадратичная ошибка  $\sigma_{F_T}$  определяется формулой

$$\sigma_{F_T} = \frac{\partial F_T}{\partial x} \cdot \sigma_x.$$

Пользуясь табличными значениями коэффициента Стьюдента  $t_s$ , для определенного числа измерений  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$ , находится доверительный интервал

$$\Delta F_T = t_s \cdot \sigma_{F_T}.$$

Значение силы тяги ЭРД находится в интервале

$$\bar{F}_T - \Delta F_T < F_T < \bar{F}_T + \Delta F_T.$$

В данной работе проводится начальная оценка тяги, для нее может быть приемлемой относительно высокая погрешность измерения [7].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью основных законов динамики получена зависимость (6) силы тяги ЭРД от максимального угла отклонения  $\varphi_{\max}$  маятника. Установлено, что  $\varphi_{\max}$  находится через перемещение  $x$  ЧЭ. Перемещения  $x$  ЧЭ измеряются с помощью разработанного и изготовленного устройства УИПЦМ. Обработка данных производится с учетом погрешностей и доверительного интервала.

## Список используемых источников

1. *James E. Polk*. Recommended Practice for Thrust Measurement in Electric Propulsion Testing // Propuls Power. – 2017. – № 33(3). – P. 539–555.
2. Вакуумная установка для огневых испытаний электрических ракетных двигателей / П. С. Гончаров [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 668. – С. 216–223.
3. *Кенио Т.* Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления : пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
4. Автоматизация технологических процессов и производств / В. И. Белозеров [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – 284 с.

5. Пат. 2221995 РФ, МПК G 01 L 5/00, G 01 V 15/00. Способ измерения силы тяги реактивного двигателя и стенд для его осуществления / Орлов С. А. [и др.]. – № 2001117354/28; заявл. 27.06.2003; опубл. 20.01.2004, Бюл. № 2. – 7 с.

6. *Бутенин Н. В., Луниц Я. Л., Меркин Д. Р.* Курс теоретической механики. – СПб. : Лань, 2022. – 732 с.

7. *Степанова Е. А., Скулкина Н. А., Волегов А. С.* Основы обработки результатов измерений : учеб. пособие. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 95 с.

Е. В. Басотин,  
*доктор технических наук, доцент;*  
Р. М. Вивчарь,  
*кандидат технических наук;*  
А. И. Птушкин,  
*кандидат технических наук, профессор*

## КОНЦЕПЦИЯ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В данной статье предлагается новая концепция управления эксплуатацией наземной космической инфраструктуры, основанная на применении как традиционных методов проактивного управления (превентивного и предиктивного), так и проактивного управления нового поколения, которое не только упреждает наступление негативных событий, но и обеспечивает снижение частоты появления подобных событий в будущем. Одновременно с этим концепция предусматривает в качестве цели управления рассматривать достижение желаемого будущего, а в качестве объекта управления – не традиционный объект (процесс эксплуатации), а динамическую систему обстоятельств, характеризующую эксплуатационную ситуацию, в которой этот процесс является одним из обстоятельств. Разработаны необходимый понятийный аппарат, система принципов построения предлагаемой системы проактивного управления эксплуатацией, методология научного анализа эксплуатационной ситуации и принятия управленческого решения. Предложенная концепция позволит обеспечить более высокую эффективность применения объектов отечественной наземной космической инфраструктуры по сравнению с зарубежными аналогами, в частности, повысить продолжительность срока службы, безопасность и экологичность ее эксплуатации, снизить суммарную продолжительность простоев оборудования, а также эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: наземная космическая инфраструктура, эксплуатация, концепция, проактивность, стратегии, проактивное управление, превентивное управление, предиктивное управление, суперактивное управление.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности управления эксплуатацией наземной космической инфраструктуры (НКИ), относящейся к числу критически важных объектов нашего государства, является важной и актуальной задачей. Это обусловлено тем, что эффективность управления эксплуатацией такой инфраструктуры непосредственным образом влияет на качество решаемых ею задач по обеспечению национальной безопасности и устойчивого развития РФ. Основное внимание в данной статье уделено вопросам повышения эффективности эксплуатации той части НКИ РФ, которая обеспечивает создание и восполнение отечественных группировок космических аппаратов (КА).

В настоящее время наметилась тенденция снижения качества выполнения НКИ этих задач, что подтверждается следующими фактами:

- при увеличении нагрузки на НКИ снизилась своевременность решения задач по обеспечению запусков космических аппаратов [1, 2];
- показатели риска получения травмы эксплуатирующим персоналом и его гибели не соответствуют требуемым значениям [3];
- экологическая обстановка в областях размещения НКИ заметно ухудшилась [4];
- стоимость эксплуатации НКИ существенно возросла вследствие необходимости проведения мероприятий по обеспечению длительного функционирования оборудования НКИ, избыточной периодичности и глубины его технического обслуживания, низкого качества обоснования состава комплектов ЗИП, роста числа негативных событий (НС) и высокой стоимости мероприятий по устранению их последствий. Под НС понимается событие, возникшее в результате изменения обстоятельств и приведшее к недостижению целей функционирования НКИ.

Сложившееся состояние обусловлено реализацией большого количества некачественных и/или несвоевременных решений, процесс обоснования которых определяется существующей концепцией управления эксплуатацией. При этом под управлением эксплуатацией понимается управление состоянием НКИ и всеми процессами, протекающими на эксплуатационной стадии ее жизненного цикла (ЖЦ). К таким процессам, например, относятся техническое обслуживание, подготовка персонала, применение НКИ по назначению, обеспечение материальными средствами и т. д.

В нашей стране современная концепция управления эксплуатацией сложных организационно-технических систем (СОТС), к которым, несомненно, относится и НКИ, характеризуется рядом проблем, на наш взгляд, не позволяющим эффективно управлять эксплуатацией такими системами.

Первая проблема лежит в области целеполагания и состоит в том, что, в большинстве случаев, целью управления является обеспечение нормального функционирования НКИ в настоящем, непосредственно здесь и сейчас, что не позволяет достичь стратегических целей, заключающихся в достижении желаемого состояния этой системы в будущем, описание которого в менеджменте принято называть видением.

Второй немаловажной проблемой является то, что в процессе принятия большинства управляющих решений отсутствует прогностическая составляющая, что не позволяет упредить наступление различных НС в будущем.

Третьей проблемой является то, что в тех случаях, когда управление эксплуатацией НКИ все же носит прогностический характер, оно направлено только лишь на упреждение возникновения НС, что не снижает частоты появления этих событий в будущем и требует времени для устранения их последствий. Это приводит к уменьшению времени нахождения оборудования НКИ в готовности к применению по назначению и увеличению эксплуатационных расходов. Кроме того, в связи с наличием среди НС опасных событий, при таком подходе к управлению сохраняется возможность их появления в будущем, что снижает показатели безопасности эксплуатации НКИ.

Четвертая проблема заключается в том, что, в большинстве случаев, выработка управляющих решений основывается на анализе эффективности эксплуатации НКИ с позиции дуализма ее оценивания. Так, эффективность эксплуатации НКИ оценивается либо парой показателей результативность-ресурсоемкость [5, 6], либо – безопасность-ресурсоемкость [7]. В связи с тем, что целями управления является одновременное обеспечение результативности, оперативности, безопасности и ресурсоемкости эксплуатации НКИ, то обоснование управляющих решений должно основываться на многокритериальной оценке эффективности, а не двухкритериальной.

Пятой проблемой современного подхода к управлению эксплуатацией НКИ, является тот факт, что при выработке управляющих решений в качестве управляемых переменных рассматриваются только параметры состояния объекта управления (обстоятельства, возникающие непосредственно внутри процесса эксплуатации НКИ), а параметры обстоятельств, в которые он погружен, считаются фиксированными и неуправляемыми. Однако корневые причины НС могут скрываться как в обстоятельствах, возникающих внутри процесса эксплуатации НКИ, так и в обстоятельствах, окружающих этот процесс.

Важным элементом НКИ является ее организационная составляющая, что обуславливает необходимость рассмотрения вопросов управления персоналом. Однако, как показывает практика, при анализе качества работы персонала рассматриваются только его количественный состав и квалификация, а вопросы группового поведения не рассматриваются вообще, что является шестой проблемой.

Целью публикации настоящей статьи является представление новой концепции управления эксплуатацией НКИ, позволяющей решить указанные выше проблемы. Предлагаемая концепция основывается на применении проактивного подхода к управлению эксплуатацией НКИ в современной его интерпретации, которая представляет собой управление траекторией движения НКИ к достижению ее желаемого состояния в будущем. Это будущее характери-

зуются более высокой эффективностью применения объектов отечественной НКИ по сравнению с их аналогами за рубежом, которая обеспечит конкурентоспособность нашей страны не только в космической области, но и в других областях жизни. Для обеспечения управления траекторией движения НКИ к ее желаемому состоянию в будущем, в представляемой концепции, предлагается перейти от управления только эксплуатацией НКИ к управлению динамической системой обстоятельств, включающей в себя как обстоятельства, возникающие в этом процессе, так и окружающие его.

В статье обсуждаются основные базовые понятия, принципы и ключевые идеи, лежащие в основе концепции, а также методологические вопросы принятия проактивных решений.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КОНЦЕПЦИИ (КОНЦЕПТЫ)

Базовыми понятиями рассматриваемой концепции, на которые опирается предлагаемая методология проактивного управления эксплуатацией НКИ, являются понятия обстоятельств, желаемого состояния НКИ в будущем, проактивного управления, системы обстоятельств – ситуации и потенциала ситуации, в которой осуществляется принятие решения по управлению эксплуатацией НКИ.

### Обстоятельства

Согласно «закону ситуации» М. Фоллет [8] проведение анализа ситуации должно быть направлено на выяснение того, что требует от управленцев возникшая ситуация. А первое, что требуется от них, это получение знаний о первопричинах ее возникновения. Это обусловлено тем, что важной частью проактивного управления эксплуатацией НКИ является устранение первопричин нарушений ее нормального функционирования, которыми являются обстоятельства, вызывающие эти нарушения. То, что первопричины следует искать в системе обстоятельств, характеризующих исследуемую ситуацию, вытекает из определения обстоятельства. Поэтому рассмотрим его более подробно.

Понятие «обстоятельство» относится к категории причинно-следственных отношений и в [9] ему дано следующее абстрактное определение: «*обстоятельство* – философская категория, обозначающая явление, воздействие которого порождает либо изменяет второе явление, именуемое следствием».

Иначе говоря, обстоятельства выступают причиной появления тех или иных явлений, например, землетрясений, отказов оборудования, принятия новых законов, нормативно-технических документов и др.

В зависимости от того, где происходят явления по отношению к самому процессу эксплуатации НКИ целесообразно разделить все обстоятельства на внутренние и внешние.

**Внутренние обстоятельства** – это обстоятельства, характеризующие непосредственно процесс эксплуатации НКИ и определяющие его сущность.

К внутренним обстоятельствам относятся цели управления эксплуатацией НКИ, структура организации и средства достижения этих целей.

Цели проактивного управления эксплуатацией НКИ имеют сложную иерархическую структуру. Декомпозиция целей должна, при этом, осуществляться до уровня, на котором они могут быть охарактеризованы количественными показателями.

Целью верхнего уровня является достижение желаемого состояния НКИ в будущем, которое характеризуется, в общем случае, достижением более высоких показателей результативности, оперативности, безопасности и экономичности ее применения по сравнению с зарубежными аналогами. Нормальное функционирование НКИ будет заключаться в достижении всех целей, соответствующих данному моменту времени.

Средства достижения целей носят социально-технический характер и включают в себя персонал, технологическую инфраструктуру и информационно-аналитические ресурсы.

Персонал подразделяется на две категории: управленцев и исполнителей.

Информационно-аналитические ресурсы необходимы для качественной поддержки принятия решений по управлению эксплуатацией НКИ и включают в себя базу данных о ее состоянии, которые должны способствовать оперативному анализу сложившихся обстоятельств с целью выяснения причин нарушения нормального функционирования НКИ, а также базу знаний. База знаний должна содержать в себе следующие элементы:

- правила (алгоритмы) глубокого анализа обстоятельств для получения их детального формализованного описания;
- накопленные знания (прецеденты) о нарушениях нормального функционирования НКИ и принятых при этом управляющих решениях;
- модели и методики прогнозирования изменения обстоятельств, позволяющих осуществить адаптацию решений к этим изменениям;
- модели и методики, позволяющие, исходя из возникших обстоятельств, обосновать оптимальное управляющее решение, а при невозможности этого – два-три приемлемых.

Совокупность внутренних обстоятельства с их взаимосвязями по своей сущности представляет не что иное, как сам процесс эксплуатации НКИ.

**Внешние обстоятельства** – это обстоятельства, находящиеся за пределами процесса эксплуатации НКИ и оказывающие влияние на него.

К внешним обстоятельствам относятся заказчики, разработчики и поставщики, независимые эксперты, привлекаемые для поддержки процесса управления эксплуатацией, научно-технический прогресс, экологические, институциональные, экономические, социокультурные и политические факторы, а также возросшие в настоящее время террористические угрозы различного характера.

Каждое из обстоятельств (как внутренних, так и внешних) имеет свои характеристики, выражающие его свойства, отличительные особенности. Примером таких характеристик для обслуживающего персонала являются его количество и квалификация, для экологических факторов – направление и скорость ветра, магнитуда землетрясения и т. п.

### **Желаемое состояние НКИ в будущем**

Под желаемым состоянием НКИ в будущем (далее желаемое будущее) будем понимать такое ее состояние, которое характеризуется следующим:

- повышением срока службы НКИ;
- минимальной суммарной продолжительностью простоев НКИ;
- абсолютной безопасностью и экологичностью эксплуатации НКИ;
- наличием оперативной связи с другими стадиями жизненного цикла (ЖЦ) НКИ;
- существенным снижением эксплуатационных расходов;
- наличием тотального мониторинга стадии эксплуатации ЖЦ НКИ, охватывающего как ее техническую и организационную структуру, так и ее среду функционирования, и системы управления ЖЦ НКИ в целом;
- наличием как у лиц, принимающих решения, так и у эксплуатирующего персонала, менталитета «делать все раз и навсегда»;
- невозможностью возникновения чрезвычайных ситуаций.

Содержание желаемого будущего НКИ определяет ЦЕЛЬ управления эксплуатацией НКИ.

### **Проактивное управление**

**Проактивное управление** – это управление, обладающее свойством проактивности, под которым будем понимать свойство системы управления, обеспечивающее упреждение наступления НС и их исключение в будущем. В основе свойства проактивности лежит способность выявлять будущие проблемы и их первопричины.

Термин «проактивное управление» носит обобщающий характер для группы упреждающих стратегий управления персоналом и техникой, которые развиваются, начиная с прошлого века

и до настоящего времени. Эти стратегии отличаются характером использования имеющихся возможностей для предотвращения проблем, возникающих в процессе эксплуатации НКИ.

Первое поколение систем проактивного управления эксплуатацией создавалось в условиях, когда по техническим, экономическим или другим причинам система контроля и прогнозирования изменения параметров обстоятельств, в которых осуществляется эксплуатация НКИ, не разрабатывалась, и момент воздействия, упреждающего наступление НС, определялся по косвенным признакам, характеризующим возможные наступления неблагоприятных событий, такими как срок эксплуатации или наработка используемого оборудования. Такая проактивная стратегия называется календарной (по наработке) или превентивной [10]. Эта стратегия, благодаря простоте организации ее применения, используется и в настоящее время.

Внедрение второго поколения систем проактивного управления эксплуатацией связано с появлением возможности создания эффективной системы определения момента проведения управленческого вмешательства для предотвращения возникновения НС на основе прогноза момента его возможного возникновения, сделанного в результате обработки данных постоянного или периодического контроля названных выше параметров. Управляющее воздействие осуществляется непосредственно перед этим моментом, что упреждает возникновение НС. Такую проактивную стратегию называют предиктивной [10, 11].

Использование названных стратегий устраняет лишь причину возможного возникновения проблемы первого порядка [12], что позволяет ее предотвратить, но сохраняет возможность повторного возникновения аналогичной проблемы. Чтобы исключить повторное возникновение проблемы необходимо найти и устранить ее первопричины. Условия, необходимые для оперативного решения этой задачи стали формироваться лишь в конце прошлого столетия и в начале текущего, что обеспечило возможность пополнения рассмотренных выше стратегий проактивной стратегией третьего поколения, целью применения которой является снижение (вплоть до полного исключения) частоты возникновения различных проблем (неблагоприятных ситуаций). Эту стратегию в соответствии с трактовкой проактивности в современной психологии как суперспособности [13, 14] в работе предложено назвать суперактивной.

Суперактивное управление является результатом конвергенции прогноза и плана (траектории) достижения прогнозируемого будущего, который базируется на реальных знаниях о препятствиях на этом пути – первопричинах возникновения НС. Из-за сложностей долгосрочного прогнозирования ее применение всегда сопряжено с риском и должно сопровождаться оценкой показателей риска выполнения принимаемых решений.

Предлагаемая концепция предусматривает гармоничное применение всего арсенала проактивных стратегий в интересах достижения желаемого будущего состояния НКИ.

### Ситуация

Все названные обстоятельства (внутренние и внешние) находятся в постоянном взаимодействии с друг другом. Например, изменение законодательной базы влияет на характер целей управления эксплуатацией НКИ, которые также зависят от заказчиков и поставщиков. Квалификация обслуживающего персонала влияет на качество функционирования технологической инфраструктуры, научно-технический прогресс определяет состав базы знаний, используемой для поддержки решений по управлению процессом эксплуатации НКИ и т. д. При этом, с течением времени, постоянное взаимодействие обстоятельств друг с другом приводит к изменению их характеристик, а также появлению новых обстоятельств со своими характеристиками.

Таким образом, совокупность названных взаимосвязанных обстоятельств, с изменяющимися во времени характеристиками, является динамической системой, которая, по нашему мнению, и представляет собой эксплуатационную ситуацию (далее – ситуацию). Поэтому эксплуатационной ситуации можно дать следующее определение: *эксплуатационная ситуация* – это динамическая система обстоятельств, влияющих на процесс достижения целей управления эксплуатацией НКИ.

Предложенная формулировка эксплуатационной ситуации как системы обстоятельств, влияющих на процесс достижения целей по управлению эксплуатацией НКИ, отличается лаконичностью и отражает ее сущность, потому что, чтобы познать любую сущность (в данном случае эксплуатационную ситуацию), «нужно взять всю совокупность явлений данной сущности в их связи» [15], т. е. систему обстоятельств. Отсюда следует, что для обеспечения управления траекторией движения НКИ к ее желаемому состоянию в будущем необходимо осуществить переход от управления непосредственно эксплуатацией НКИ к управлению динамической системой обстоятельств, включающей в себя как обстоятельства, возникающие в этом процессе, так и окружающие его.

Данный факт существенным образом отличает предложенную концепцию управления эксплуатацией НКИ от существующей и обуславливает обеспечение возможности нахождения и устранения первопричин нарушений нормального функционирования НКИ, иначе говоря, суперактивности управления, что является необходимым условием проактивного управления.

### **Потенциал ситуации**

Обстоятельства, определяющие ситуацию, в том числе и эксплуатационную, в любой момент времени, помимо классификации, представленной выше, можно разделить на два подмножества: позитивные (благоприятствующие переводу текущей ситуации в требуемую) и негативные (обстоятельства, препятствующие этому переводу).

Выявление этих подмножеств с их характеристиками и взаимосвязями является важным элементом определения потенциала ситуации, еще одного понятия разработанной концепции, под которым будем понимать следующее: *потенциал эксплуатационной ситуации* – это совокупность обстоятельств, характеризующих возможности перевода текущего состояния ситуации в требуемое, обеспечивающее достижение целей управления эксплуатацией НКИ.

Однако такое представление потенциала ситуации носит качественный характер и не учитывает взаимосвязи между этими обстоятельствами, что затрудняет его анализ ЛПР и может повлиять на эффективность принятия управляющего решения. Поэтому более привлекательным выглядит представление ЛПР для анализа альтернативных решений интегрального показателя их качества, который определяется с учетом взаимосвязей названных выше возможностей. В качестве показателей качества решений целесообразно рассматривать показатели риска недостижения их целей [16]. Значения этих показателей в данном случае будут зависеть от потенциала ситуации и содержания предлагаемого альтернативного решения. Представление ЛПР таких интегральных показателей позволит существенно повысить эффективность процесса выбора управляющих решений, за счет обеспечения принципа риск-ориентированности.

Исследование потенциала ситуации является ключевой частью ее научного анализа, а результаты этого исследования представляют собой варианты альтернативных решений с соответствующим им значениями показателей риска, которые используются ЛПР в процессе принятия управляющего решения.

### **ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНЦЕПЦИИ**

В предлагаемой концепции характерной особенностью методологии принятия управляющих решений, основанной на идеологии проактивного управления, является то, что в ее основе лежит не один какой-либо принцип, например, ситуационности или адаптивности, а единый комплекс взаимосвязанных общеизвестных фундаментальных принципов управления и специфических принципов, обеспечивающих проактивность управления.

Рассмотрим основные принципы из состава этого комплекса.

Из числа фундаментальных принципов остановимся на принципах научности, системности, ситуационности, обратной связи, адаптивности, риск- и эко-ориентированности.



Соблюдение *принципов научности, системности и ситуационности* достигается за счет того, что ситуация рассматривается как динамическая система обстоятельств, процесс управления которой основывается на ее глубоком научном анализе с использованием имеющегося арсенала современных научных методов познания объектов управления, целью которого является изучение ее внутренней логики, выяснения «требований» ситуации и ее потенциала.

*Принцип обратной связи* реализуется в результате координации управленческих действий в случае отклонения траектории движения к достижению поставленной цели от первоначально заданной траектории, которые могут сводиться либо к возвращению системы на эту же траекторию, либо на более выгодную, в данных условиях, новую траекторию.

Обеспечение *адаптивности* достигается за счет того, что проактивное управление ситуацией подразумевает постоянное изучение ее изменений, их прогнозирование и соотнесение разрабатываемых решений с этими изменениями.

*Риск- и эко-ориентированность* обеспечиваются за счет того, что в процессе принятия решения учитываются факторы неопределенности, а среди внешних обстоятельств рассматриваются и экологические факторы.

К *специфическим принципам*, обеспечивающим проактивность управления, относятся следующие:

- ориентация на достижение желаемого состояния НКИ в будущем;
- переход от широко известного принципа ситуационного управления по обстоятельствам [17] к непосредственному управлению обстоятельствами;
- обеспечение эффективности достижения множественности целей управления.

**Принцип ориентации на достижение желаемого состояния НКИ в будущем** подразумевает, что любое решение, принимаемое в процессе управления эксплуатацией НКИ должно быть обязательно направлено на достижение желаемого состояния НКИ в будущем (стратегической цели управления).

**Принцип управления обстоятельствами** заключается в том, что объектом управления выступает эксплуатационная ситуация, представляющая собой динамическую систему обстоятельств процесса эксплуатации НКИ, в которых скрываются первопричины недостижения целей этого процесса. Выработка решений по устранению этих причин путем воздействия на обстоятельства, в которых они содержались, и их последовательная реализация позволят исключить возможность недостижения этих целей в будущем.

**Принцип обеспечения достижения множественности целей управления** заключается в том, что в процессе выработки управляющих решений должно быть уделено внимание обеспечению достижения комплекса целей, а именно целей по результативности, оперативности, безопасности и стоимости применения НКИ по назначению. Только такой подход к выбору управляющих решений позволит в конечном итоге достигнуть желаемого состояния НКИ в будущем.

## КЛЮЧЕВЫЕ ИДЕИ КОНЦЕПЦИИ

Первая ключевая идея концепции связана с формулировкой цели проактивного управления эксплуатацией НКИ, внедрение которого позволит решить указанные выше проблемы и, как следствие, повысить его эффективность за счет придания ему проактивных функций, позволяющих избежать будущих проблем.

В соответствии с этим *первой ключевой идеей* предлагаемой концепции является следующая идея: целью проактивного управления эксплуатацией НКИ должно являться достижение ее желаемого состояния в будущем, которое позволит обеспечить более высокую эффективность ее применения в сравнении с зарубежными аналогами.

Представленная ранее характеристика желаемого состояния НКИ в будущем предполагает, что проактивные управляющие решения, направленные на достижение такого состояния, должны обосновываться на базе комплексного показателя эффективности функционирова-

ния НКИ, включающего в себя одновременно показатели безопасности, результативности, своевременности достижения требуемого результата и ресурсоемкости, что позволит избавиться от указанной выше проблемы, связанной с дуализмом оценивания эффективности эксплуатации НКИ. Постановка такой цели проактивного управления эксплуатацией НКИ является безусловно амбициозной, но именно за счет этого, такое управление позволит продлить срок службы оборудования НКИ, повысить безопасность и экологичность ее эксплуатации, а также снизить эксплуатационные расходы.

Так как целью проактивного управления эксплуатацией НКИ является достижение желаемого состояния НКИ в будущем, то предлагаемая концепция должна раскрывать способы управления траекторией движения к такому состоянию. Отсюда вытекает *вторая ключевая идея* концепции: управление движением к желаемому состоянию НКИ в будущем должно основываться на применении совокупности проактивных стратегий: превентивной, предиктивной и суперактивной.

Рациональное соотношение этих стратегий приведет к снижению продолжительности простоев оборудования НКИ, повышению безопасности и экономичности их эксплуатации.

Конкретный спектр названных стратегий определяется свойствами составных частей объекта управления и наличием возможностей для их применения.

*Третья ключевая идея* концепции предусматривает в качестве объекта управления рассматривать не только собственно процесс эксплуатации, но и обстоятельства, в которых он протекает, т. е. единую динамическую систему обстоятельств, представляющую собой эксплуатационную ситуацию, что позволит повысить эффективности управления эксплуатацией НКИ не только в настоящем, но и в будущем.

Необходимость учета динамических свойств такого объекта управления обусловлено тем, что проактивное управление всегда направлено на достижение не только краткосрочных, но и долгосрочных (стратегических) целей. Процесс достижения последних является продолжительным и происходит в условиях непрерывных параметрических и структурных изменений обстоятельств. Постоянный учет этих изменений необходим при долгосрочном прогнозировании будущего состояния НКИ.

Как показывает практика эксплуатации НКИ большинство первопричин возникновения НС, которыми выступают обстоятельства, вызывающие эти события, следует искать за пределами непосредственно процесса эксплуатации НКИ, а также и на других стадиях ЖЦ.

Поэтому в реализации проактивного управления НКИ будут принимать участие не только эксплуатационный персонал, но и другие участники ЖЦ НКИ.

*Четвертая ключевая идея* предлагаемой концепции заключается в следующем: методология проактивного управления персоналом должна быть направлена на формирование у него проактивного видения своей деятельности, а также должна учитывать особенности его группового поведения, что позволит снизить показатели риска недостижения целей управления.

Так как НКИ содержит организационную составляющую, то проактивное управление ее эксплуатацией должно предусматривать привитие лицам, принимающим решения, и исполнителям менталитета «устранять проблему навсегда», а также формирование лидерских качеств управленческого персонала.

При этом важно при проактивном управлении персоналом учитывать особенности его группового поведения путем разработки модели деятельности персонала, исходные данные для которой будут представлены в виде комплекса переменных, характеризующих количество персонала, уровень его квалификации, а также психосоциальные параметры (эмоциональное состояние, уровень собственных требований каждого индивида, спаянность коллектива и др.)

Достижение цели предлагаемой концепции проактивного управления эксплуатацией НКИ возможно только за счет качественной реализации ее ключевых идей. К основным направлениям ее реализации относятся:

- формирование комплекса моделей и методов проактивного управления эксплуатацией НКИ, которое должно опираться на анализ обстоятельств принятия управляющих решений и исходить из необходимости достижения синергетического эффекта от их применения;
- адаптация структуры существующей системы управления эксплуатацией НКИ под использование проактивного подхода.

Проактивное управление эксплуатацией НКИ является сложным многошаговым процессом, который, в общем случае, включает в себя прогнозирование изменения характеристик рассматриваемых обстоятельств и выяснение первопричин как этих изменений, так и наступления НС, а также формирование на этой основе управляющих решений. Эффективное проведение указанного процесса возможно только путем использования соответствующих моделей и методов.

В рамках адаптации структуры существующей системы управления эксплуатацией НКИ под использование проактивного подхода должны быть предусмотрены:

- осуществление постоянного контроля за характеристиками всего многообразия обстоятельств (технических, технологических, экономических и организационных), происходящего на всех стадиях ЖЦ НКИ, и обеспечение непрерывного обмена информацией о значениях этих характеристик между всеми стадиями. Это необходимо для формирования соответствующих проактивных управляющих воздействий, как на процесс эксплуатации НКИ, так и на процессы, протекающие на других стадиях ЖЦ;
- автоматизация и интеллектуализация процесса проактивного управления эксплуатацией НКИ, целесообразность которых вытекает из необходимости повышения оперативности принятия управляющих решений, использования больших потоков данных, обуславливающих процесс проактивного управления эксплуатацией НКИ, а также высоких вычислительных сложностей этого процесса.

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СИТУАЦИЕЙ**

Для более детального рассмотрения сущности предложенной концепции и взаимосвязей между основными ее элементами была разработана модель, структура которой представлена на рис. 1. Входными данными для модели является текущая эксплуатационная ситуация, а выходными – результаты реализации решения по ее переводу в требуемое состояние.

Структурно процесс управления эксплуатационной ситуацией включает в себя три последовательных этапа, которыми являются научный анализ ситуации, принятие решения и его реализация. Рассмотрим их более подробно.

### **Научный анализ эксплуатационной ситуации**

Рассмотрение концептуальной модели начнем с ключевого и наиболее трудоемкого ее этапа, а именно научного анализа эксплуатационной ситуации.

Целью научного анализа является осознание текущей эксплуатационной ситуации. Этот процесс условно может быть разделен на три этапа: восприятие ситуации, осмысление ситуации и выбор альтернативных проактивных решений по ее изменению, обеспечивающих достижение желаемого состояния НКИ в будущем.

**Восприятие ситуации.** На основе данных, полученных с помощью органов чувств человека и специальных датчиков, предназначенных для контроля характеристик обстоятельств, в которых осуществляется эксплуатация НКИ, аналитиками составляется описание ситуации, а также оценивается имеющийся фонд времени для проведения ее научного анализа и определения необходимости принятия каких-либо корректирующих воздействий на нее. Наиболее характерными являются следующие три случая.



Рис. 1. Структура концептуальной модели проактивного управления эксплуатационной ситуацией

1. Если в процессе восприятия ситуации фиксируется нормальное функционирование НКИ и отсутствие признаков его нарушения как в настоящем так, и в будущем, а также признаков изменения характеристик внешних обстоятельств, то выделение времени на выработку управляющего решения не требуется. Это решение очевидно: «Продолжить наблюдение».

2. Если в процессе восприятия ситуации фиксируется нормальное функционирование НКИ, однако выявлена тенденция ухудшения каких-либо характеристик его качества в результате наступления новых НС, которые через определенный промежуток времени могут привести к прекращению ее функционирования, или несоответствию новым требованиям заказчика, а также новым законодательным актам и другим руководящим документам. В этом случае управляющие решения должны быть направлены как на обеспечение недопустимости перехода текущей эксплуатационной ситуации в критическую, характеризующуюся нарушением нормального функционирования НКИ (превентивные и предиктивные проактивные решения), так и на обеспечение недопустимости появления такой ситуации в будущем (суперактивные проактивные решения).

Располагаемый фонд времени на принятие превентивных и предиктивных решений будет определяться названным выше промежуток времени, а фонд времени на разработку суперактивного проактивного управления будет определяться после успешной ликвидации НС. При этом, важно отметить, что реализация всей совокупности проактивных решений позволит в конечном итоге достичь желаемого состояния НКИ в будущем.

3. Если в процессе восприятия ситуации фиксируется нарушение нормального функционирования НКИ. В этом случае на передний план выходит необходимость скорейшего обеспечения нормального функционирования НКИ и управляющее решение должно быть, в первую очередь, направлено именно на это. Вопрос обеспечения проактивного управления переносится на второй план – к категории стратегических решений, к выработке которых необходимо будет приступить после удачной реализации принятого решения по восстановлению нормального функционирования НКИ.

**Осмысление ситуации.** На этом этапе процесс анализа фокусируется на изучении взаимодействия обстоятельств, как бинарных, так и множественных. Знание этих отношений позволит делать выводы о том, что и почему с ними происходит и получить новые знания

об эксплуатационной ситуации, в частности, знания о первопричинах возникновения анализируемой ситуации, которые послужат, в дальнейшем, фундаментом для формирования суперактивных управляющих решений, направленных на обеспечение достижения желаемого будущего НКИ. Необходимость делать выводы вытекает из того факта, что не вся информация об отношениях между элементами ситуации (обстоятельствами) может быть получена только опытным путем. К первопричинам возникновения анализируемой ситуации относятся как непосредственно причины, приведшие, например, к появлению нарушения нормального функционирования НКИ, так и прогнозируемые причины, которые могут к этому привести в будущем.

По результатам восприятия ситуации, в зависимости от того, какие цели не были или могут быть не достигнуты и каковы причины этого, а также располагаемого фонда времени на принятие решения, формируются варианты альтернативных оперативных, превентивных, предиктивных и суперактивных решений по переводу текущей эксплуатационной ситуации в требуемое состояние.

Данные решения позволят выделить из обстоятельств, полученных на первом этапе, позитивные и негативные. Эта информация является необходимой для проведения важного компонента этапа осмысления, а именно выяснения потенциала ситуации. Выяснение потенциала ситуации даст возможность понять, какие существуют возможности для вскрытия и устранения первопричины возникновения НС, что является необходимым условием формирования суперактивных проактивных решений, а также какими возможностями обладает ситуация для использования позитивных обстоятельств и нейтрализации негативных при реализации того или иного варианта решения.

Завершается этап созданием аналитико-имитационной динамической модели эксплуатационной ситуации или ее коррекцией, в случае наличия такой модели в базе знаний. Использование такой модели позволит на следующем этапе научного анализа прогнозировать изменение ситуации, оценивать влияние возможных решений на характеристики обстоятельств, а также оценить показатели риска недостижения целей этих решений. При этом прогнозирование изменения эксплуатационной ситуации должно заключаться не только в определении времени достижения тех или иных характеристик обстоятельств, но и возможных причин этого.

**Выбор проактивных решений.** Выбор приемлемых проактивных решений осуществляется на основе сравнения альтернативных решений, полученных на предыдущем этапе. В качестве критерия для сравнения решений должны выступать показатели риска недостижения их целей, полученные в результате прогнозирования изменения эксплуатационной ситуации.

Прогнозирование изменения ситуации осуществляется с помощью модели ситуации, разработанной на предыдущем этапе.

Необходимо отметить, что в результате сравнения различных альтернативных решений может быть выявлено наличие двух и более недоминируемых альтернатив. С целью снижения критериальной неопределенности в процессе принятия решения целесообразно, помимо определения показателей риска недостижения каждой цели при реализации того или иного решения, определять показатели риска недостижения одновременно всех целей. Для этого может быть использован подход, представленный в [18].

Таким образом результатом выполнения этапа выбора проактивных решений является предоставление ЛПР наиболее приемлемых решений с соответствующими им показателями риска, как недостижения каждой цели по отдельности, так и комплекса целей.

Необходимо также отметить, что полученная на этапе выбора проактивных решений информация позволит в дальнейшем подтвердить пригодность исходной модели эксплуатационной ситуации или откорректировать ее. Использование прогностических возможностей созданной модели эксплуатационной ситуации обеспечит выявление будущих проблем и возможностей их преодоления, а также принятие обоснованных решений, обеспечивающих успешное достижение желаемого будущего НКИ.

Второй и третий этапы научного анализа должны проводиться с использованием глубоких знаний – знаний, представленных в виде моделей, позволяющих объяснить выявленные причинно-следственные связи, характерные для рассматриваемой ситуации, и содержащихся в БЗ.

### **Принятие проактивного решения и его реализация**

Результаты научного анализа являются исходной информацией ЛПР для принятия окончательного решения. При принятии решения ЛПР опирается на собственный опыт, знания и интуицию, которые, не лишним будет напомнить, представляют собой часть внутренних обстоятельств эксплуатационной ситуации. Результатом данного процесса является формирование одного из трех типов решений:

- согласиться с одним из предложенных альтернативных решений;
- сформировать свое собственное решение, направленное на перевод текущего состояния ситуации в требуемое;
- подвергнуть ситуацию дополнительному научному анализу с целью уяснения более точной информации о ней и формирования на ее основе новых вариантов решений.

Принятое окончательное решение подлежит реализации. Основными этапами этого процесса являются:

- разработка плана реализации проактивного решения, который определяет комплекс работ и необходимые для их выполнения объем ресурсов и число исполнителей;
- доведение плана работ до всех задействованных лиц и постановка задач им;
- контроль выполнения решения. Контроль исполнения решений предполагает постоянное наблюдение за значениями характеристик обстоятельств, изменяющимися в процессе выполнения запланированного комплекса работ, с целью своевременного обнаружения или предупреждения отклонений этих значений, выявление дополнительных возможностей, способствующих успешной реализации решения;
- оценивание результатов реализации решения. На этом этапе ситуация, возникшая в результате реализации решения, подвергается научному анализу, целью которого является определение фактической эффективности решения, а также необходимости его коррекции или принятии принципиально нового решения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В разработанной концепции управления эксплуатацией НКИ предложены направления решения следующих проблем: целеполагания, упреждения наступлений НС и их исключения в будущем, многокритериального оценивания эффективности эксплуатации НКИ, выявления и ликвидации корневых причин наступления НС и управления групповым поведением персонала.

Эти проблемы решаются на основе применения проактивного подхода в современной его интерпретации, которая представляет собой управление траекторией движения НКИ к достижению ее желаемого состояния в будущем.

Проанализирована эволюция трех поколений стратегий проактивного управления: превентивной, предиктивной, а также стратегии третьего поколения, которую предложено назвать суперактивной, так как ее использование не только упреждает наступление НС в настоящем, но и обеспечивает постепенное снижение частоты появления подобных событий, вплоть до их полного исключения в будущем. Концепция предусматривает гармоничное использование всех названных стратегий. Такой подход к управлению эксплуатацией НКИ применяется впервые.

При рассмотрении основных понятий концепции уточнены такие понятия как желаемое будущее, проактивное управление, ситуация и потенциал ситуации. Показана взаимосвязь

этих понятий, отраженная в концептуальной модели проактивного управления эксплуатационной ситуацией.

Характерной особенностью принятия управляющих решений в разработанной концепции является то, что данный процесс основывается не на одном каком-либо принципе, например, ситуационности или адаптивности, а на едином комплексе взаимосвязанных общеизвестных фундаментальных принципов управления и специфических принципов, обеспечивающих проактивность управления. В совокупности с системой основных понятий эти принципы раскрывают сущность применения проактивного подхода к управлению эксплуатацией НКИ, что позволяет значительно расширить представления об этом процессе.

В отличие от известных разработанная концепция проактивного управления эксплуатацией НКИ предполагает:

- в качестве цели управления рассматривать достижение желаемого состояния НКИ в будущем;
- рассмотрение в качестве объекта управления не традиционного объекта – процесса эксплуатации НКИ, а динамической системы обстоятельств, характеризующей эксплуатационную ситуацию, в которой этот процесс является одним из обстоятельств;
- использование в качестве показателя эффективности эксплуатации НКИ комплексного показателя, включающего в себя одновременно показатели безопасности, результативности, своевременности достижения требуемого результата и ресурсоемкости;
- использование для управления траекторией движения к желаемому состоянию НКИ в будущем совокупности трех стратегий проактивного управления: превентивной, предиктивной и суперактивной;
- учет при проактивном управлении персоналом особенностей его группового поведения;
- внедрение конвергентных технологий в процессы научного анализа и управления эксплуатационной ситуацией.

Все названные элементы, характеризующие предлагаемую концепцию, являются новыми, и для их внедрения понадобится адаптация структуры существующей системы управления эксплуатацией НКИ.

Предложенная концепция позволит обеспечить более высокую эффективность применения объектов отечественной НКИ по сравнению с зарубежными аналогами, в частности повысить частоту запусков КА, продолжительность срока службы НКИ, безопасность и экологичность ее эксплуатации, снизить суммарную продолжительность простоев оборудования НКИ, а также эксплуатационные расходы.

### Список используемых источников

1. *Есинов Е. Н., Решетников Д. В., Степенко А. Н.* Исследование подходов к оцениванию риска невыполнения целевых задач космическим ракетным комплексом // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники : материалы V ВНКП. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2022. – С. 90–95.
2. Имитационное моделирование функционирования системы эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры как инструмент обоснования параметров технического обслуживания / Р. М. Вивчарь [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 688. – С. 87–98.
3. *Андреев Е. А., Решетников Д. В.* Система управления безопасностью эксплуатации систем электроснабжения опасных производственных объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 35–38.
4. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Архангельской области до 2035 года : обл. зак. № 57-5-ОЗ от 18.02.2019. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/document/2900201902200003.html> (дата обращения: 17.06.2024).

5. *Лисицкий В. В., Мартынов А. М.* Концепция адаптивного ситуационного синтеза структур системы эксплуатации сложных технических систем // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 684. – С. 256–264.
6. *Перминов А. Н.* Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния : моногр. – СПб., 2005. – 320 с.
7. *Патенков Д. Г.* Методический подход обеспечения безопасности и предупреждения происшествий ракетно-космического комплекса // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 65–84.
8. *Фоллет М.* Отдача распоряжений. Классики теории государственного управления: американская школа / под ред. Дж. Шафритца, А. Хайда. – М. : Изд-во МГУ, 2003. – 167 с.
9. Диалектика как философская теория развития, ее принципы, законы и категории (2020 год). – URL: <https://in-inch.ru/dialektika-kak-filosofskaja-teorija-razvitija-ee.html> (дата обращения: 17.06.2024).
10. *Moubray J.* Reliability-centered maintenance. – 2nd ed. – Industrial Press Inc. NY, 1997. – 440 p.
11. RCM GUIDE. Reliability-centered maintenance guide. For Facilities and Collateral Equipment // National Aeronautics and Space Administration. – 2008. – URL : <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/nasa-rcmguide.html> (дата обращения: 01.09.2024).
12. *Andersen B., Fagerhaug T.* Root cause analysis: simplified tools and techniques. – American Society for Quality, Quality Press, 2006. – 240 p.
13. *Thomas S. Bateman.* Why Proactivity Is the Superpower You Can and Should Develop. – URL : [psy-chologytoday.com/us/blog/getting-proactive/201811](https://psy-chologytoday.com/us/blog/getting-proactive/201811) (дата обращения: 10.09.2024).
14. *Thomas S. Bateman.* Proactivity. – URL : [practicalwisdom.buzzsprout.com](https://practicalwisdom.buzzsprout.com) (дата обращения: 11.09.2024).
15. Философский энциклопедический словарь. – М. : Сов. энциклопедия, 1983. – 720 с.
16. *Вивчарь Р. М., Соколов Б. В., Птушкин А. И.* Риск-ориентированное управление созданием организационно-технических систем на основе использования имитационных моделей их функционирования // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. : Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 2. – С. 17–31.
17. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика. – М. : Наука, 1989. – 198 с.
18. *Вивчарь Р. М., Соколов Б. В., Птушкин А. И.* Методика многокритериального оценивания эффективности функционирования стохастических сложных технических систем // Авиакосмические приборостроение. – 2022. – № 7. – С. 3–14.



А. Е. Воронин,  
кандидат технических наук;  
Н. Е. Пешехонов,  
кандидат технических наук, доцент;  
В. В. Рыбаков,  
кандидат технических наук

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрено обеспечение потребителей первой категории по надежности электроснабжения с применением источников резервного электроснабжения при учете экономических показателей всех элементов системы электроснабжения. Определен порядок построения диаграммы для определения критичной длины линии электропередачи, при которой экономические показатели централизованного и децентрализованного вариантов построения системы резервного электроснабжения равны.

Ключевые слова: источники резервного электроснабжения, годовые приведенные затраты, оптимизационная задача, структура резервной системы электроснабжения.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения потребителей электроэнергии, относящихся к первой категории по надежности электроснабжения, как правило, необходимо использовать дополнительные (резервные) источники электрической энергии. Наиболее часто в качестве таких источников используются дизельные электростанции (ДЭС). В то же время при размещении сооружений объекта на значительных расстояниях друг от друга (сотни метров или даже километры) возникает задача оптимизации, с точки зрения экономических затрат, количества источников резервного электроснабжения (ИРЭ).

Требования к надежности электроснабжения потребителей, отнесенных к первой категории, очень высокие, поэтому в дополнение к основной системе электроснабжения создается резервная система, которая позволяет обеспечить потребителей электроэнергией не только при отказе основных источников, но также и при отказе линий электропередачи, обеспечивающих связь основных источников и потребителей. Статья посвящена определению структуры резервной системы электроснабжения с минимальными экономическими показателями.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ РЕЗЕРВНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассмотрим следующую схему: два объекта расположены на расстоянии  $l$  (длина возможной линии электропередачи), расчетные мощности электроприемников на объектах – соответственно  $P_i$  и  $P_{i+1}$  (рис. 1).

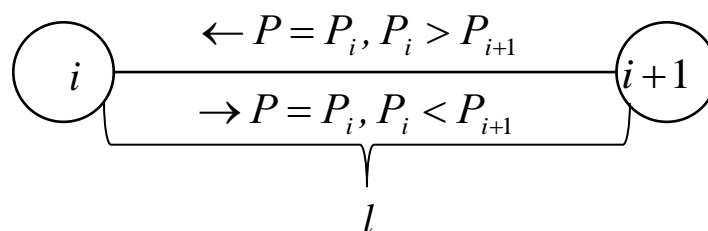


Рис. 1. Определение мест установки источников резервного электроснабжения

Предположим, что в качестве источника резервного электроснабжения используются дизельные электростанции, хотя все рассуждения будут справедливы и для любых других ИРЭ. Из анализа технико-экономических показателей ИРЭ известно, что зависимость удельных капиталовложений на 1 кВт установленной мощности ( $k$ ) от полной мощности ДЭС ( $P_{\text{ИРЭ}}$ ) имеет нелинейный характер. С учетом принятых допущений такой же характер будет и у удельных годовых приведенных затрат ( $Z_{\text{ИРЭ}}^y$ ) на ИРЭ (рис. 2).

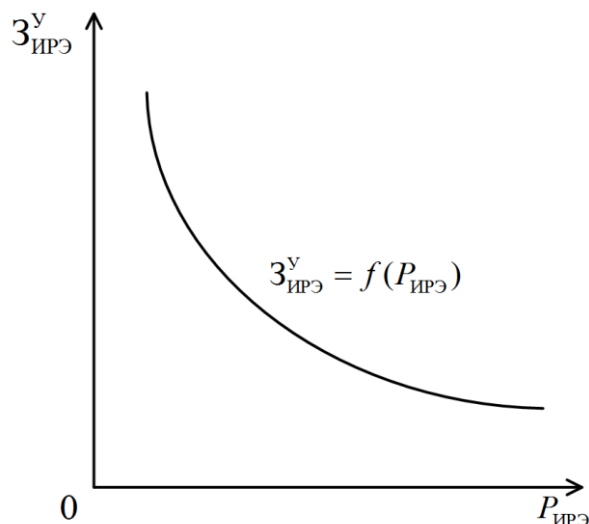


Рис. 2. Зависимость удельных затрат от мощности источника

Возможны два варианта построения резервной системы электроснабжения (РСЭС) для этих объектов:

- ИРЭ установлен на каждом объекте (децентрализованная схема);
- ИРЭ установлен на объекте с большой расчетной мощностью, а второй объект получает питание по ЛЭП высокого напряжения (10 кВ) через трансформаторные подстанции (ТП).

Приравнявая годовые приведенные затраты по обоим вариантам определим, при каких расчетных мощностях потребителей и расстояниях между объектами возможна равноэкономичность вариантов:

$$Z_{\text{ИРЭ}i} + Z_{\text{ИРЭ}i+1} = Z_{\text{ИРЭ}} + Z_{\text{ЛЭП}} + Z_{\text{ТП}}, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{ИРЭ}i}$  – годовые приведенные затраты по первому варианту, включают в себя затраты на ИРЭ  $i$ -м ( $Z_{\text{ИРЭ}i}$ ) объектах;

$Z_{\text{ИРЭ}i+1}$  – годовые приведенные затраты на ИРЭ по первому варианту, включают в себя затраты на ИРЭ  $i+1$ -м ( $Z_{\text{ИРЭ}i+1}$ ) объектах;

$Z_{\text{ИРЭ}}$  – годовые приведенные затраты на ИРЭ по второму варианту;

$Z_{\text{ЛЭП}}$  – годовые приведенные затраты на линию электропередачи;

$Z_{\text{ТП}}$  – годовые приведенные затраты на трансформаторные подстанции.

Известно, что годовые приведенные затраты на ИРЭ, ТП и ЛЭП определяются следующими выражениями [1]:

$$\begin{aligned} Z_{\text{ИРЭ}i} &= p_{\text{ИРЭС}} \times k_i \cdot P_i, \\ Z_{\text{ТП}} &= p_{\text{ТПС}} \cdot (A_{\text{ТП}} + B_{\text{ТП}} \cdot P_{i+1}), \\ Z_{\text{ЛЭП}} &= p_{\text{ЛЭС}} \cdot (A_{\text{ЛЭП}} + B_{\text{ЛЭП}} \times P_{i+1}) \cdot l, \end{aligned} \quad (2)$$

- где  $P_{ИРЭС}$ ,  $P_{ТПС}$ ,  $P_{ЛЭС}$  – суммарные отчисления от капиталовложений на ИРЭ, ТП и ЛЭП соответственно;
- $k_i$  – удельные капитальные вложения на ИРЭ;
- $A_{ТП}$  – постоянная часть капитальных вложений;
- $B_{ТП}$  – удельные капитальные вложения на электрооборудование ТП и его монтаж;
- $A_{ЛЭС}$  – часть капитальных вложений на ЛЭП, не зависящая от сечения;
- $B_{ЛЭС}$  – удельные капитальные вложения на ЛЭП на единицу длины и сечения.

Годовые приведенные затраты на ИРЭ, ТП и ЛЭП из формулы (2) подставим в выражение (1) и получим:

$$Z_{ИРЭi} + Z_{ИРЭi+1} = Z_{ИРЭС} + Z_{ЛЭС} + Z_{ТП} \quad (3)$$

или

$$P_{ИРЭС} \cdot k_i \cdot P_i + P_{ИРЭС} \cdot k_{i+1} \cdot P_{i+1} = P_{ИРЭС} \cdot k_{\Sigma} \cdot (P_i + P_{i+1}) + (A_{ТП} + B_{ТП} \cdot P_{i+1}) \cdot p_{ТПС} \cdot 2 + (A_{ЛЭС} + B_{ЛЭС} \cdot P_{i+1}) \cdot l \cdot p_{ЛЭС} \quad (4)$$

Группируя слагаемые выражения (4), включающие  $P_i$  и  $P_{i+1}$ , получим

$$P_{ИРЭС} \cdot P_{i+1} \left[ k_{i+1} - k_{\Sigma} + (k_i - k_{\Sigma}) \cdot \frac{P_i}{P_{i+1}} \right] - 2 \cdot p_{ТПС} \cdot (A_{ТП} + B_{ТП} \cdot P_{i+1}) = (A_{ЛЭС} + B_{ЛЭС} \cdot P_{i+1}) \cdot l \cdot p_{ЛЭС} \quad (5)$$

Введем следующие обозначения:

$\Delta k_i = k_i - k_{\Sigma}$  – разность удельных капитальных вложений на строительство ИРЭ мощностью  $P_i$  и  $P_i + P_{i+1}$ ;

$\Delta k_{i+1} = k_{i+1} - k_{\Sigma}$  – разность удельных капитальных вложений на строительство ИРЭ мощностью  $P_{i+1}$  и  $P_i + P_{i+1}$ ;

$\Delta k$  – приведенная разность удельных капитальных вложений.

Приведенная разность удельных капитальных вложений определяется по следующему выражению:

$$\Delta k = k_{i+1} + k_{i+1} \cdot \frac{P_i}{P_{i+1}} \quad (6)$$

Порядок определения разности удельных капитальных вложений для мощности  $P_{i+1}$  и  $P_i + P_{i+1}$  показан на рис. 3.

Учитывая, что рассматриваются равноэкономичные варианты, длину линий электропередачи, получаемую по выражению (7), примем за критическую длину ЛЭП ( $l_{кр}$ ).

Подставляя выражение (5) в формулу (4) и решая его относительно  $l$ , получим следующее соотношение:

$$l = \frac{P_{ИРЭС} \cdot P_{i+1} \cdot \Delta k - 2 \cdot p_{ТПС} \cdot (A_{ТП} + B_{ТП} \cdot P_{i+1})}{p_{ЛЭС} \cdot (A_{ЛЭС} + B_{ЛЭС} \cdot P_{i+1})} \quad (7)$$

Учитывая, что рассматриваются равноэкономичные варианты, длину линий электропередачи, получаемую по выражению (7), примем за критическую длину ЛЭП ( $l_{кр}$ ).

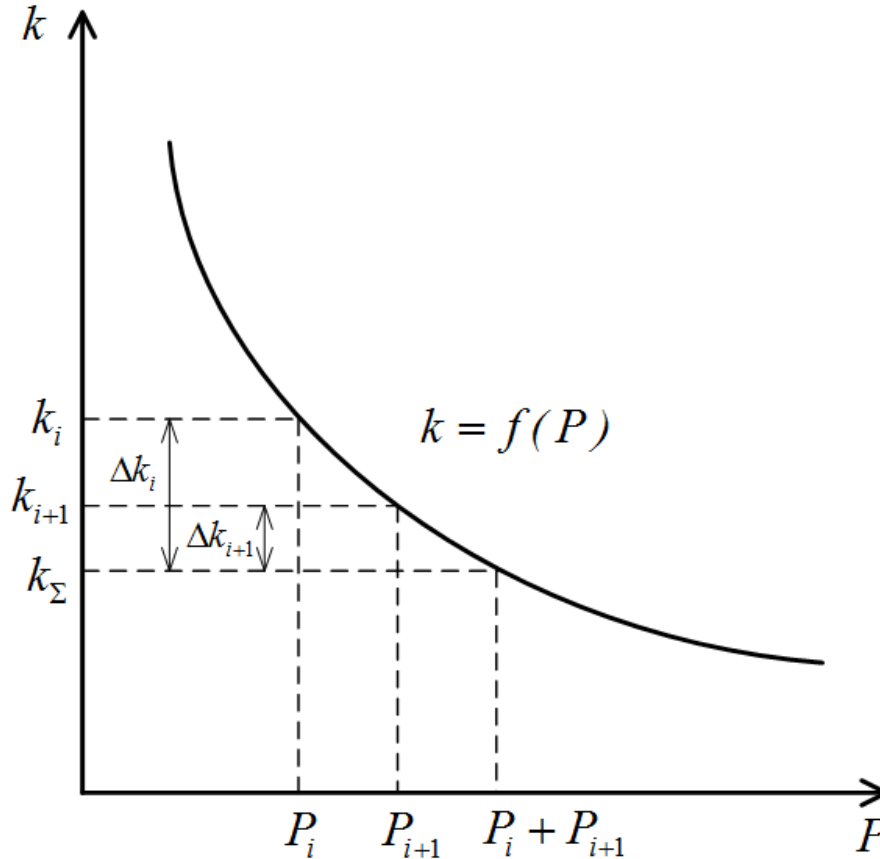


Рис. 3. Определение разности удельных капитальных вложений

Для низковольтных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ ( $Z_{ТП} = 0$ ) критическая длина ЛЭП будет определяться выражением

$$l_{\text{КР}}^{\text{H}} = \frac{P_{\text{ИРЭС}} \cdot P_{i+1} \cdot \Delta k}{P_{\text{ЛЭПС}} \cdot (A_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}} + B_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}} \cdot P_{i+1})}, \quad (8)$$

где  $l_{\text{КР}}^{\text{H}}$  – критическая длина низковольтных линий ЛЭП;

$A_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}}, B_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}}$  – постоянные коэффициенты для низковольтных линий ЛЭП.

Определим зависимость, выражающую границу между критической длиной ЛЭП высокого напряжения и такой же длиной низкого напряжения. С этой целью преобразуем (8) к следующему виду:

$$P_{i+1} = \frac{P_{\text{ЛЭПС}} \cdot l_{\text{КР}}^{\text{H}} \cdot A_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}}}{P_{\text{ИРЭС}} \cdot \Delta k - P_{\text{ЛЭПС}} \cdot B_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}} \cdot l_{\text{КР}}^{\text{H}}}. \quad (9)$$

Из выражений (7) и (5) получим

$$l_{\text{КР}} = \frac{P_{\text{ИРЭС}} \cdot \Delta k \cdot P_{\text{ЛЭПС}} \cdot A_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}} - 2 \cdot P_{\text{ТПС}} \cdot A_{\text{ТП}} (P_{\text{ИРЭС}} \cdot \Delta k - l_{\text{КР}}^{\text{H}} \cdot P_{\text{ЛЭПС}} \cdot B_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}}) - B_{\text{ТП}} \cdot P_{\text{ЛЭПС}} \cdot l_{\text{КР}}^{\text{H}} \cdot A_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}}}{P_{\text{ЛЭПС}} \cdot A_{\text{ЛЭП}}^{\text{B}} \cdot (P_{\text{ИРЭС}} \cdot \Delta k - l_{\text{КР}}^{\text{H}} \cdot P_{\text{ЛЭПС}} \cdot B_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}}) + B_{\text{ЛЭП}}^{\text{B}} \cdot P_{\text{ЛЭПС}} \cdot l_{\text{КР}}^{\text{H}} \cdot A_{\text{ЛЭП}}^{\text{H}}}. \quad (10)$$

На основании полученных выражений построена диаграмма для определения критической длины ЛЭП при известной зависимости  $k = f(P)$  и для заданных расчетных мощностей потребителей на  $i$ -м и  $i+1$  объектах (рис. 4).

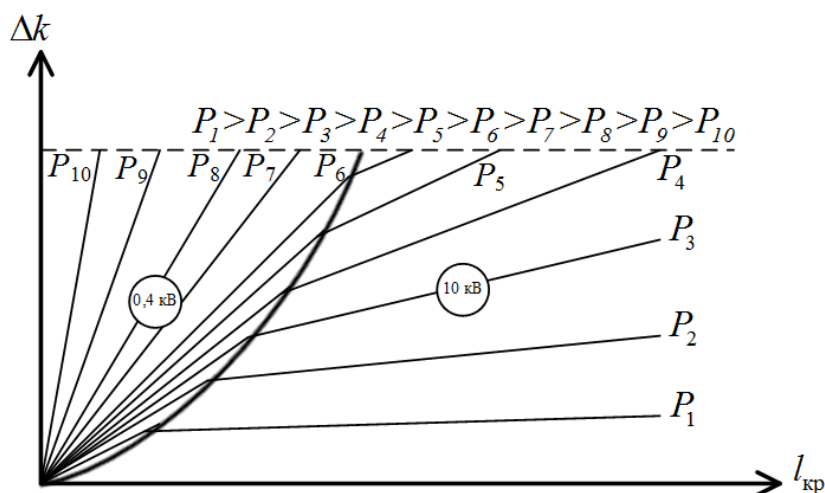


Рис. 4. Диаграмма для определения критической длины ЛЭП

Используя диаграмму на этапе предварительного анализа, зная тип источников резервного электроснабжения и линий электропередачи, их экономические показатели, можно определить места размещения ИРЭ. С этой целью необходимо полученную по диаграмме критическую длину ЛЭП сопоставить с действительной длиной ЛЭП. При  $l > l_{кр}$  источники резервного электроснабжения размещаются на каждом объекте, при  $l < l_{кр}$  ИРЭ размещаются на объекте с большей расчетной мощностью электроприемников, а при  $l = l_{кр}$  необходимо учитывать другие факторы, которые позволяют принять решение о предпочтительности того или иного варианта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами предложен алгоритм построения диаграммы для определения критической длины линий электропередачи, связывающих резервные источники электроснабжения и потребители электроэнергии. Полученная диаграмма позволяет перед применением математических методов оптимизации [2] получить опорное решение задачи построения оптимальной структуры системы резервного электроснабжения.

Диаграмма может быть рекомендована для предварительного анализа различных вариантов построения системы электроснабжения.

## Список используемых источников

1. Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В., Рыбаков Д. В. Системы электроснабжения специальных объектов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 185 с.
2. Пешехонов Н. Е., Воронин А. Е., Порядин Д. И. Оптимизация структуры системы электроснабжения на основе применения модифицированного симплекс-метода // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 688. – С. 99–104.

И. А. Ефременков;  
В. В. Козлов,  
*доктор технических наук, профессор;*  
А. В. Лагун,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
А. Д. Сыров

## **МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗОХОДА ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА**

В статье представлены подходы к решению задачи об определении причин низкой долговечности стальной облицовки газохода пусковых установок ракетно-космических комплексов и даны предложения по возможным вариантам восстановления работоспособного состояния газохода пусковых установок.

Получены новые аналитические соотношения для оценочного инженерного расчета процессов нагружения конструкций пускового оборудования, характерного для условий пуска ракет космического назначения.

Ключевые слова: пусковое оборудование, струя продуктов сгорания, газодинамические нагрузки, тепловые нагрузки, прочность, долговечность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Спектр работ, выполняемых в условиях функционирования ракетно-космического комплекса (РКК) при подготовке и пуске ракеты космического назначения (РКН), очень широк.

В наиболее общем случае все эксплуатационные процессы, протекающие в условиях подготовки и пуска РКН, могут быть объединены в большие группы, связанные с движением твердых тел, движением жидкости и газа, перемещением энергетических и иных потоков.

Основным структурным элементом стартового комплекса является пусковой стол, входящий в состав пускового оборудования СК. Сам пусковой стол представляет собой конструкцию, состоящую из силовых элементов для размещения на них РКН и газохода для отвода газовой струи двигательной установки от РКН при ее пуске. Основные нагрузки от происходящих процессов на СК приходятся на перечисленные элементы пускового стола.

Для данного оборудования важно знать, как ведут себя конструкционные материалы, из которых состоят его элементы, в цикле нагружения при пуске РКН и в процессе остывания конструкции пускового стола после ухода РКН с опор пускового стола. Такая информация нужна для решения следующих задач:

- оценки объема времени, необходимого для подготовки нового пуска;
- получения оценочных соотношений, определяющих появившиеся в процессе пуска температурные напряжения, информация о которых используется при проектировании и эксплуатации пускового оборудования СК. По величине таких напряжений, сопровождающих нагрев и остывания, можно судить о долговечности силовой конструкции пускового стола, в том числе о состоянии его газохода.

### **АНАЛИЗ ПУСКОВЫХ НАГРУЗОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ СТАРТЕ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Газоход пускового устройства, являясь одним из его конструктивных элементов, в процессе пуска РКН воспринимает циклическую нагрузку от струи ДУ.

В то же время металлооблицовка газохода в период старта ракеты воспринимает нагрузки, связанные с резким нагревом, а затем с остыванием плит газохода, что также характеризуется их циклическим нагружением. Причем каждый цикл «нагрев-остывание» связан как с

временными, так и пространственными внешними факторами, которые повторяются при проведении пуска. Исходя из физической картины пуска, к таким факторам относят следующие возникающие нагрузки:

- силы давления ( $P = P(x, y, z, t)$ ) от газового потока продуктов сгорания двигательной установки (ДУ) внутри газохода, имеющего сложную пространственную конфигурацию;
- силовое нагружение металлооблицовки газохода;
- тепловое нагружение металлооблицовки газохода.

Сам пуск ракеты сопровождается импульсным силовым воздействием на элементы пускового устройства, нарастающим по времени. Данное воздействие может иметь значения в следующем диапазоне:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 5 \div 10 \text{ (МПа/с)}.$$

В то же время уровень давления, который воспринимает металлооблицовка газохода, может составлять

$$P_{\max} = 0,1 \div 0,3 \text{ (МПа)}.$$

Физическая картина, характеризующая течение газа из смеси продуктов сгорания и окружающего воздуха в газоход, позволяет сделать следующие выводы о возникающих нагрузках:

- струя продуктов сгорания компонентов ракетных топлив (КРТ), возникающая при старте РКН, имеет сложную бочкообразную структуру, причем такую структуру трудно описать математически;
- при истечении в газоход пускового стола (ПС) направление движения струи продуктов сгорания КРТ многократно изменяется. При каждом таком изменении в газоход появляется скачок уплотнения со сложной структурой и конфигурацией. Осуществить расчет параметров образованных скачков уплотнения математически практически невозможно, они могут быть определены только при проведении численных экспериментов;
- процесс ухода ракеты с опор пускового устройства естественно связан с подъемом струи продуктов сгорания ДУ, что приводит к изменению условий функционирования потока этой струи, который натекает на каналы газохода пускового устройства.

Старт РКН характеризуется следующими физическими процессами:

- выходом из сопел двигательной установки (ДУ) ударных волн в начальные моменты времени после запуска;
- истечением струй продуктов сгорания КРТ из сопел ДУ;
- воздействием ударных волн на элементы конструкции ПС и днище ракеты-носителя;
- мощными акустическими колебаниями в газодинамических каналах ПС и окружающем РКН пространстве.

Возникающие при этом тепловые нагрузки на металлооблицовку газохода ПС от струи продуктов сгорания КРТ характеризуются следующими процессами:

- возникновением мощного теплового потока (по составу конвективного и лучистого). Такой тепловой поток изменяется в следующих пределах:

$$q = 1 \div 4 \frac{MBm}{m^2};$$

- созданием теплового удара, который вызывает сильное тепловое нагружение элементов ПС. Величину изменения температуры в зависимости от временных интервалов можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 800 \div 3500 K^0;$$

– прогревом металлооблицовки газохода, который происходит по всем направлениям и имеет нестационарную зависимость

$$T = T(t, x, y, z).$$

Величина температуры газового потока продуктов сгорания КРТ, истекающего в газоход из ДУ, значительно выше температуры плавления плит металлооблицовки газохода ПС:

$$(T_{\text{газа}} \gg T_{\text{сталь}}^{\text{пл}}).$$

Работа ДУ РКН при производстве пуска РКН влечет за собой возникновение явления абляции материала, из которого изготовлена металлооблицовка газохода ПС, причем унос материала с листа металлооблицовки происходит со скоростью 1 мм/с и может изменяться в зависимости от марки материала.

Время остывания листов металлооблицовки составляет 6–10 часов, что позволяет возникшим напряжениям не превышать пределы текучести материалов, из которых они сделаны.

В состав этапов функционирования металлооблицовки газохода входит процесс «пуск-нагрев-остывание». Оценка уровня теплового нагружения плит металлооблицовки следует определять в трехмерном измерении с учетом временных интервалов

$$T = T(t, x, y, z).$$

В процессе пуска РКН высвобождаемая тепловая энергия в объеме 95–98% поглощается окружающим пространством. Процесс осуществления пуска связан с изменением теплофизических свойств и характеристик материалов, из которых созданы элементы ПУ.

Осуществление пуска РКН также неразрывно связано с возникающим силовым нагружением конструкции ПС, охарактеризованным следующими процессами, протекающими в металле, из которого изготовлены металлооблицовка и силовая конструкция ПС:

– возникающие нагрузки от давления  $P$  и температуры  $T$  струи продуктов сгорания КРТ влекут за собой деформацию материала, из которого сделаны элементы конструкции ПС. Такие изменения в материале характеризуются не только величиной деформации, но и скоростью и ускорением ее изменения в сторону увеличения  $\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \ddot{\varepsilon}$ ;

– возникшая деформация вызывает появление нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений в конструкции элементов ПС;

– силовые нагрузки на элементы ПС имеют большую величину;

– металлооблицовка газохода как элемент ПС функционирует в условиях пластичности и ползучести, что влечет за собой появление в плитах газохода увеличивающейся остаточной деформации и напряжений;

– увеличивающиеся при старте РКН силовые и тепловые нагрузки от струи продуктов сгорания КРТ развиваются в нестационарном режиме;

– механические свойства материалов для элементов конструкции ПС подвергаются изменениям;

– пластические материалы, используемые в элементах конструкции ПС, приобретают свойства хрупких тел, поэтому возникающие нагрузки тормозят текучесть материала, в следствии чего возникают волны напряжения в материалах;

– значительно растут величины рабочих температур, что влечет за собой изменение характеристик конструкционных материалов ПС в сторону их размягчения;

– анизотропия, как свойство конструкционных материалов, изменяется как во временном интервале, так и при изменении величины возникающих пусковых нагрузок;

– в элементах, входящих в состав конструкции ПС, происходит накопление остаточной деформации в период пусков РКН.



Снижение работоспособности как газохода, так и силовой конструкции пускового стола в целом происходит под влиянием описанных выше процессов. Последствия от воздействия нагрузок, возникающих в результате этих процессов, сильно влияют на выполнение требований, предъявляемых к пусковому оборудованию в целом по назначению. Поэтому следует своевременно принимать решения по восстановлению работоспособности элементов пусковых столов. Для этого необходимо разработать алгоритм, максимально учитывающий возникающие при пуске РКН пусковые нагрузки, которые влияют на техническое состояние этих элементов и устройства в целом.

Общий расчет выполнен по алгоритму, схема которого изображена на рис. 1.



Рис. 1. Схема оценивания состояния газохода пускового стола

На данной схеме показана роль газодинамических расчетов при оценке долговечности пускового устройства РКК. Для оценивания долговечности пускового оборудования необходимо определить время наступления разрушения и количество пусков до разрушения. Для этого требуется определить среднюю температуру за цикл (нагрев–остывание), проанализировать что и происходит при тепловом нагружении и определить параметры теплового нагружения материалов конструкции ПС. Для получения исходных данных этого расчета потребуется провести газодинамический расчет, в процессе которого определить поля давлений, температур и скоростей газового потока продуктов сгорания КРТ, а также поля плотности газового потока. Для этого исходными данными будут параметры ДУ, теплофизические характеристики продуктов сгорания и геометрия газохода.

## ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛИСТА ОБЛИЦОВКИ ГАЗОХОДА

Уникальность исследуемого объекта в основном заключается в том, что уровень нагрузок (силовых, от сил давления и тепловых) нигде в машиностроении не наблюдается. Традиционные подходы к оцениванию усталостного разрушения металлоконструкции в основном сводятся к исследованию работы конструкции в сложных циклах с силовыми напряжениями, где нет циклического воздействия температур. В этих условиях слой металла при определенной стадии нагружения будет представлен мозаикой из следующих категорий зерен:

- испытывающих пластические деформационные нагрузки;
- менее напряженных, благодаря удачной ориентации кристаллических плоскостей и действующим на них касательным напряжениям.

Этапы развития повреждения листа металлооблицовки газохода представлены на рис. 2.



Рис. 2. Этапы развития повреждения листа металлооблицовки газохода:  
 а – расположение зерен в пластине; б – процесс повреждения зерен в пластине;  
 в, г – степени развития трещин в пластине

Процесс же упругопластической деформации связан с изменениями структуры материала листа металлооблицовки, которые выражены в вытяжке перенапряженных зерен, в возникновении межзерновых сдвигов, а также в повороте зерен относительно друг друга.

Дальнейшее продолжение действия напряжений вызывает развитие повреждений, что выражается в выходе дислокаций повреждений на поверхность пластины. Картина развития повреждений металла при продолжении действию напряжений представлена на рис. 2,б. Причем продвижение повреждений на поверхность металла приостанавливается, благодаря следующим препятствиям:

- кристаллической ориентации смежных друг относительно друга зерен;
- наличие примесей в межзерновой прослойке, обладающей атомарно-кристаллической решеткой со значительными изменениями, которое приводит к несовпадению типа кристаллической решетки зерна.

В этом случае усталостная прочность материала определяется средней величиной напряжения, необходимого для преодоления межзерновых барьеров. Когда средний уровень напряжений вызывает появление трещин в пластине, которые по величине не превышают размер ее зерен, а также имеют возможность быть «залеченными», когда напряжений нет, тогда величину этих напряжений можно считать пределом выносливости. В случае выхода величины трещины за пределы размера зерна она продолжает расширяться скачкообразно, следствием этого станет преобразование ее в макротрещину, обладающую возможностью изменения направления распространения, способную увеличиваться в более слабых участках пластины практически перпендикулярно направлению действия растягивающих напряжений, максимальных по величине. Такая картина отражена на рис. 2,в.

Скорость развития трещин увеличивается вследствие возникновения в месте ее основания резкой концентрации напряжений. Причем макротрещина получает развитие из-за продолжения действия на нее напряжений. В этом случае величина напряжений уже не играет большой роли, распространение трещины будет продолжаться даже при небольших значениях напряжений, а их величина может уменьшаться при увеличении трещины. Однако при этом увеличивается число трещин. Часть трещин наталкиваются на препятствия, а другая их часть получает дальнейшее развитие. Процесс развития повреждения листа отражен на рис. 2,г. При сложных циклах  $\sigma$ - $T$  картина образования трещин в принципе аналогичная.

Оценивание долговечности металлоконструкции в рассматриваемой задаче носит скорее качественный, чем количественный характер.

Метод оценивания долговечности носит название «метод минимума связей». Он специально разработан для конструкционных материалов, работающих в переменных циклах по напряжению и температуре. Этот метод признан постоянно действующим международным семинаром MPC-EPRI-NASA [2].

Суть метода сводится к получению простых инженерных оценок долговечности при наличии незначительного количества статистически достоверных зависимостей для металлов и сплавов. Метод дает уверенную оценку по времени разрушения материала  $t_R$ , работающего со средневзвешенными в цикле напряжениями  $\sigma_{cp}$  и температурами  $T_{cp}$ . При этом под разрушением понимается появление различных трещин в металле.

Метод содержит в основном две зависимости.

Первая зависимость служит для определения скорости деформаций  $\dot{\epsilon}$  (рис. 3):

$$\lg \dot{\epsilon} = f_1(\sigma_{cp}, T_{cp}).$$

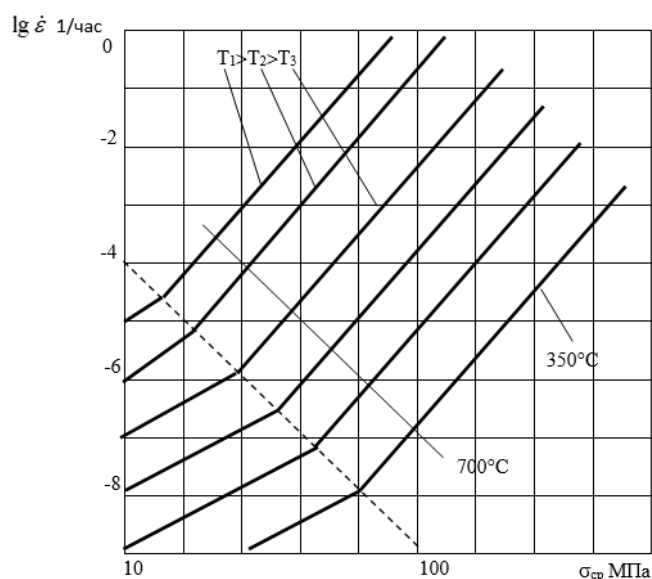


Рис. 3. Графическая зависимость скорости деформации

На графике этой зависимости ясно видны два участка, соответствующих двум основным видам деформаций, развивающимся одна за другой по мере роста рабочих напряжений. Первая из них связана с механизмом диффузии в решетке, а вторая (более крутая) – с диффузией по ядру дислокаций в металле.

Вторая зависимость  $\lg t_R = f_2(\lg \dot{\epsilon})$  основана на открытии Монкмана – Гранта, суть которого сводится к тому, что для подавляющего количества металлов и сплавов справедливо соотношение  $\dot{\epsilon} \cdot t_R = \text{const}$ .

Представленные на рис. 4 графики двух основных зависимостей метода минимума связей опубликованы в [2] и содержат фактические данные для жаропрочных легированных сталей.

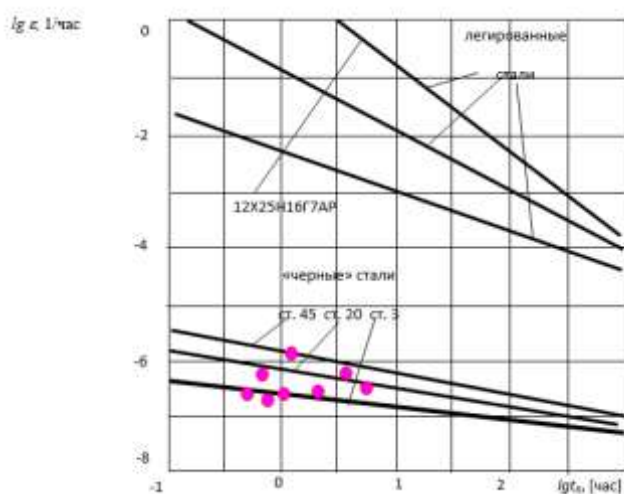


Рис. 4. Графическая зависимость скорости деформации для различных материалов

Обширная же статистика по низкоуглеродистым (черным) сталям, работающим в таких условиях, практически отсутствует, поскольку такие стали предназначены для других условий эксплуатации. Те же незначительные, сигнально-лабораторные данные по свойствам сталей марок 10, 15, 20 и 45, которые опубликованы в отечественной литературе [3, 4], нанесены на два базовых графика и позволяют воспользоваться ими на полукачественном уровне.

Согласно имеющимся данным, низкоуглеродистые стали по своим свойствам хорошо согласуются с зависимостью

$$\lg \dot{\varepsilon} = f_1(\sigma_{cp}, T_{cp}),$$

полученной для жаропрочных легированных сталей. Данные же по времени разрушения этих сталей

$$\lg t_R = f_2(\lg \dot{\varepsilon}),$$

показывают, что для средневзвешенных напряжений, полученных из прочностного расчета  $\sigma_{cp} = \sigma_T$  и средневзвешенных температур  $T_{cp} = 500 \div 600 \text{ K}$ , рассчитанных по остыванию из условий равенства температурных напряжений значению предела текучести, следует, что качество сталей, работающих в переменных циклах  $\sigma$ - $T$ , значительно влияет на их долговечность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных расчетов основными причинами появления трещин в металлических конструкциях облицовки ПС можно считать:

- 1) создание газодинамических каналов сложной конфигурации, в которых происходит поворот потока газа из продуктов сгорания КРТ, приводящий к локальному повышению температуры и давления продуктов сгорания;
- 2) значительную протяженность листов металлооблицовки, которая приводит к существенным абсолютным значениям теплового расширения листов, что, в свою очередь, приводит к запредельным температурным напряжениям.

### Список используемых источников

1. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости газа. – Изд. 5-е, перераб. – М. : Наука, 1978. – 736 с.
2. *Лагун А. В., Козлов В. В., Сыров А. Д.* Решение задачи снижения деструктивного воздействия на элементы пускового устройства и стартового сооружения при старте ракеты-носителя // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 679. – С. 221–232.
3. Справочник машиностроителя / под ред. акад. Е. А. Чудакова. – М. : Машиностроение, 1951. – 1036 с.
4. *Строев С. С., Пульцин Н. М.* Материаловедение. – Л. : ЛКИВА, 1968. – 394 с.
5. *Садин Д. В.* Основы теории моделирования волновых гетерогенных процессов. – СПб. : МО РФ, 2000. – 213 с.
6. *Лагун А. В., Козлов В. В., Сыров А. Д.* Исследование пути снижения газодинамических нагрузок при пуске ракеты космического назначения «Союз-2» // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем средств выведения в интересах решения задач Вооруженных Сил Российской Федерации». – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2022. – С. 154–166.

С. С. Камчалов;  
В. В. Карагодин,  
*доктор технических наук, профессор;*  
К. А. Полянский,  
*кандидат технических наук*

## **МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ**

В данной статье обоснована необходимость оптимизации структуры и параметров систем электроснабжения объектов наземной космической инфраструктуры. Рассмотрены существующие подходы к решению задачи оптимизации систем бесперебойного электроснабжения, а также предложен новый подход к определению ее конфигурации с применением модифицированного алгоритма кластеризации.

Ключевые слова: объект наземной космической инфраструктуры, система электроснабжения, система бесперебойного электроснабжения, оптимизация, конфигурация, алгоритмы кластеризации.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Модернизация и реконструкция объектов наземной космической инфраструктуры (ОНКИ) характеризуется внедрением непрерывных технологических процессов, компьютерной техники и других устройств на базе полупроводниковых элементов. В связи с этим технические системы, от работы которых зависит эффективность функционирования данного оборудования, должны обладать с точки зрения надежности более совершенными эксплуатационными свойствами [1]. К таким системам относится система бесперебойного электроснабжения (СБЭ), предназначенная для обеспечения потребителей особой группы I категории надежности электроснабжения, не допускающих отклонений показателей качества электроэнергии за допустимые пределы [2]. Современные СБЭ ОКИ, как объект исследования, по принципу своего функционирования (поведения) можно отнести к сложным техническим системам (СТС), при этом учитывая их разветвленную структуру, большое количество взаимосвязанных и взаимодействующих элементов. СБЭ состоит из источников бесперебойного питания (ИБП), распределительных устройств и распределительных электрических сетей (кабельных линий), взаимосвязанных процессом передачи, распределения и потребления электрической энергии. В связи с этим при осуществлении реконструкции таких систем целесообразно оценивать возможные варианты построения СБЭ с точки зрения эффективности функционирования. Для того чтобы определить наилучший вариант построения СБЭ (рациональный, оптимальный) необходимо выбрать из всех возможных вариантов один единственный с наилучшими показателями эффективности функционирования. Однако оценивание эффективности функционирования СБЭ ОНКИ как сложной технической системы представляет собой многокритериальную задачу оптимизации с большим числом оптимизируемых параметров.

Если 10 лет назад лицо, принимающее решение, могло в силу простоты структуры СБЭ определить рациональный (оптимальный) вариант ее построения на основе личного опыта, то сейчас выбор оптимальных решений между различными вариантами построения СБЭ без применения научно-методического обоснования сделать значительно сложнее, если вообще возможно. Ввиду того, что ОНКИ являются уникальными, а их потребители предъявляют различные требования к надежности и качеству электрической энергии, подходы к оптимизации СБЭ одного ОНКИ могут быть не применимы или неэффективны для другого ОНКИ.

Проведенный анализ существующих подходов к решению задачи оптимизации СБЭ [3–6] показал, что большинство из них носит частный характер и применимы только на этапах проектирования. Учитывая современные тенденции развития космической отрасли, возрастающую функциональную взаимосвязь СБЭ с другими техническими и технологическими системами ОНКИ, такой подход может приводить к уменьшению эффективности функционирования СБЭ в процессе эксплуатации, так как при появлении нового технологического оборудования возможность его подключения определяется по принципу «где есть свободное место» и не учитывается, какое влияние оно окажет на других потребителей и систему в целом.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость доработки существующих подходов к решению задачи оптимизации СБЭ ОНКИ, применение которых позволит обеспечить эффективность функционирования системы как на этапе проектирования и разработки, так и в процессе эксплуатации с учетом возможного изменения количественного и качественного состава потребителей.

В данной статье рассмотрен подход к решению задачи оптимизации СБЭ ОНКИ на этапах реконструкции с применением алгоритмов кластеризации.

### **ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТА ОПТИМИЗАЦИИ**

Оптимизация СБЭ заключается в выборе ее оптимальной конфигурации (выбор количества и мест расположения ИБП, их параметров; определение длины и сечения проводников от ИБП до мест подключения технологического оборудования) по одному или нескольким критериям оптимальности. Для СБЭ ОНКИ в качестве критериев оптимальности чаще всего используют критерии надежности и экономичности. На основе выбранного критерия оптимизации разрабатывается целевая функция и определяется система ограничений.

На сегодняшний день существует огромное количество методов решения оптимизационных задач [7]. Применительно к СБЭ наиболее разработанными являются методы линейного программирования (ЛП), которые позволяют найти оптимальное решение при линейной целевой функции и линейных ограничениях за конечное число шагов [8]. Аналитически методы решения задач ЛП сводятся к алгоритму, который заключается в переборе возможных вариантов решения и определении из всех допустимых одного оптимального. Однако размерность таких задач даже для современной вычислительной техники вызывает трудности и не позволяет ее решить традиционными способами, поскольку число вариантов равно количеству случайных сочетаний. В реальных задачах оптимизации СБЭ во избежание большой размерности чаще всего используют методы направленного перебора, среди которых наиболее известен симплекс-метод и различные его модификации (метод ветвей и границ, метод искусственного базиса, двойственный симплекс-метод). Однако такой подход применим не для всех объектов, включая и рассматриваемые СБЭ ОНКИ, ввиду ряда присущих им особенностей.

В состав ОНКИ входят объекты со значительными геометрическими размерами, по всей площади которых размещены потребители электроэнергии. Эта особенность приводит, в частности, к необходимости учета при решении задачи оптимизации длин кабельных линий между элементами СБЭ.

Количество потребителей особой группы I категории надежности электроснабжения, получающих электроэнергию от СБЭ, превышает десятки единиц. К таким объектам относится монтажно-испытательный корпус, который входит в состав ракетно-космических комплексов и технологическое оборудование которого обеспечивает проведение всего комплекса ра-

бот по подготовке, испытаниям и транспортировке ракет-носителей (РН), космических аппаратов (КА) и разгонных блоков (РБ).

Анализ пусков ракет космического назначения (РКН) показал, что количество пусков за последние 3 года возросло в 1,5 раза [9], а количество КА, выводимых на околоземную орбиту в 2,5 раза. Кроме того, изменяется и модельный ряд КА, что влечет за собой необходимость оборудования новых мест по их подготовке, а также увеличение интенсивности использования технологического оборудования ОКИ. Подключение нового технологического оборудования приводит к изменению либо структуры СБЭ, либо параметров ее элементов.

Существующие подходы к оптимизации СБЭ как при проектировании, так и при реконструкции не учитывают изменчивость состава потребителей и их влияние с точки зрения электромагнитной совместимости на другие потребители и СБЭ в целом. В процессе эксплуатации эффективность функционирования данных СБЭ может уменьшаться.

Для решения данной проблемы необходимо рассматривать СБЭ и ее потребителей как единую систему «СБЭ – потребители» [10, 11] и при проектировании и реконструкции применять системный подход.

### **СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ**

Эффективность функционирования как технологического оборудования, так и бортового оборудования (КА, РН) во многом определяется надежностью электроснабжения, поэтому обеспечение надежности СБЭ является первостепенной задачей при ее проектировании и реконструкции.

Применение системного подхода при решении задачи оптимизации системы «СБЭ – потребители» в процессе эксплуатации предполагает, что при необходимости подключения к СБЭ вновь вводимого технологического оборудования требуется выбрать оптимальную структуру и параметры СБЭ с учетом требований к надежности электроснабжения данного оборудования. Когда количество потребителей превышает десятки единиц, учесть требования по надежности каждого потребителя при реконструкции СБЭ становится проблематично, поэтому применяют различные способы повышения надежности. Одним из таких способов является структурное резервирование элементов СБЭ, при котором резервируются отдельные части (элементы) системы. Например, ИБП как наиболее сложный элемент. При структурном резервировании различают основной элемент, который необходим для функционирования СБЭ, и резервные, обеспечивающие работоспособное состояние системы при отказе основного элемента.

Учет возможности резервирования при решении оптимизационной задачи приводит к еще большей размерности оптимизационной задачи, так как требует рассмотрения всех возможных вариантов построения СБЭ для всех потребителей. Число вариантов для полного перебора с  $n$  переменными будет составлять

$$N = 2^{((n-1)(2m-1))}, \quad (1)$$

где  $m$  – сумма основных и резервных ИБП.

Для СБЭ с десятью точками присоединения потребителей ( $n = 10$ ), одним основным и одним резервным ИБП ( $m = 1+1$ ), количество вариантов перебора достигает  $N = 134\,217\,728$ .

Данная проблема может быть частично решена путем применения принципа декомпозиции. Для рассматриваемой задачи под декомпозицией понимается переход от одной задачи структурно-параметрической оптимизации к нескольким задачам меньшей размерности. Это позволит при подключении нового технологического оборудования оптимизировать структуру и параметры СБЭ с учетом его требований к надежности, а также оценить его влияние на другие потребители с учетом его места присоединения к СБЭ.



**Формализованная постановка задачи** структурно-параметрической оптимизации выглядит следующим образом.

Объектом оптимизации является система «СБЭ – потребители», представляющая собой совокупность источников бесперебойного питания и потребителей особой группы I категории надежности электроснабжения, объединенных распределительными электрическими сетями (кабельными линиями) и функционирующая в различных условиях эксплуатации.

Результатом реконструкции СБЭ может быть один из возможных вариантов  $Y_1, Y_2, \dots, Y_t$ , образующих множество  $Y$ . Каждый  $t$ -й вариант построения СБЭ  $Y_t$  характеризуется вектором характеристик  $V_t, t = 1, 2, \dots, u$ , где  $u$  – общее число допустимых вариантов построения СБЭ. Вместе с тем  $V_t$  включает: количество мест установки ИБП  $H_t$ , количество ИБП  $UPS_t$ , количество потребителей  $G_t$ , параметры кабельных линий  $L_t$ , определяемые единичными элементами матрицы связности  $\{l_{iz}\}_t$ , где  $l_{iz} = 1$  в случае наличия кабельной линии из  $z$  – места установки ИБП к  $i$ -му потребителю (группе потребителей) и  $l_{iz} = 0$  – в противном случае и стоимостью кабельных линий  $C_{iz}^L$ .

Задано множество возможных вариантов объединения потребителей в группы  $G = \{g_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, h$ , вектор характеристик потребителей  $\xi_i = \{P_{ном\ i}; \cos\varphi_i; p_{треб\ i}^{СЭС}; k_{C\ i}; x_i; y_i\}$ , где  $x_i, y_i$  – координаты мест подключения потребителей к СБЭ;  $P_{ном\ i}$  – мощность потребителей;  $p_{треб\ i}^{СЭС}$  – заданная вероятность безотказной работы;  $\cos\varphi_i, k_{C\ i}$  – коэффициенты мощности и спроса  $i$ -го потребителя (группы потребителей) соответственно. Задано множество ИБП  $UPS = \{ups_j\}, j = 1, 2, \dots, l$ , вектор характеристик ИБП  $B_j$ , включающий номинальную мощность ИБП ( $P_{ном\ j}$ ), стоимость ( $C_{ИБП\ j}$ ), вероятность безотказной работы ( $P_{ИБП\ j}$ ) и множество возможных вариантов установки ИБП  $H = \{h_z\}, z = 1, 2, \dots, n$ , определяемое единичными элементами матрицы связности  $\{b_{zj}\}$ , где  $b_{zj} = 1$ , если в месте  $H_z$  установлен  $j$ -й ИБП,  $b_{zj} = 0$  – иначе.

В результате подключения новых потребителей эффективность функционирования СБЭ может снижаться. Для повышения эффективности необходимо оптимизировать структуру и параметры СБЭ с учетом требований новых потребителей к надежности и месту размещения. Поскольку целевым назначением СБЭ является непрерывное обеспечение потребителей электроэнергией с требуемым уровнем надежности ( $P^{СБЭ} \geq P_{треб\ i}^{СЭС}$ ), то с учетом данного требования оптимальной следует считать СБЭ с наилучшими показателями экономичности.

Так как ресурсы расходуются не только при построении СБЭ, но и при ее эксплуатации, то в качестве показателя эффективности функционирования выступает вектор затрат ( $Z_t$ ), состоящий из суммарной стоимости затрат на построение и эксплуатацию СБЭ. При этом  $Z_t$  является функцией от параметров исходных данных:

$$Z_t = Z_t[V_t, \xi_i, B_j]. \quad (2)$$

При известных затратах на построение и эксплуатацию  $t$ -го варианта построения СБЭ и условии, что надежность СБЭ ( $P^{СБЭ}$ ) будет не меньше требуемой ( $P_{треб\ i}^{СЭС}$ ), **математическая постановка задачи** по критерию оптимальности выглядит следующим образом:

$$Y_t(V_t^*) = \operatorname{argmin} Z_t[V_t, \xi_i, B_j], Y_t \in Y, t = 1, 2, \dots, u, i = 1, 2, \dots, h, j = 1, 2, \dots, l,$$

при ограничениях  $P^{СБЭ} \geq P_{треб\ i}^{СЭС}$ .

Для решения данной задачи необходимо сгруппировать потребителей в зависимости от их мест размещения, тем самым определив ее начальную структуру. Формирование предполагаемой структуры СБЭ должно предшествовать оптимизации параметров ее элементов, что позволит определить область возможных вариантов построения СБЭ. Такой подход, как показывают исследования [12], является наиболее эффективным.

Группирование потребителей основывается на установлении правил, в соответствии с которыми рассматриваемый потребитель может быть отнесен к той или иной группе. Согласно

работе [13] одним из эффективных методов объединения объектов в группы в координатном пространстве является применение алгоритмов кластеризации.

*Кластеризация* – это объединение объектов (потребителей) в группы (кластеры) на основе схожести признаков для объектов одной группы и отличий между группами [14]. Для их успешного применения необходимо выбрать подходящий алгоритм, учитывая специфику функционирования СБЭ ОНКИ. Среди основных алгоритмов кластеризации можно выделить: иерархическую кластеризацию, метод  $k$  – средних ( $k$  – means), метод среднего сдвига (*mean-shift*), *DBScan* (*Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise*) и др.

Учитывая, что потребители ОНКИ распределены по всей его площади и места их размещения известны, наиболее эффективным алгоритмом кластеризации является алгоритм *DBScan*, так как он позволяет работать с данными пространственного характера. Алгоритм является простым в реализации, способен обрабатывать большие объемы данных и формировать кластеры любой формы. Поэтому за основу выбран именно алгоритм *DBScan* и адаптирован для решения задачи оптимизации СБЭ ОНКИ с помощью математического пакета *Matlab*.

Модифицированный алгоритм кластеризации позволяет сгруппировать потребители в кластеры с учетом мест размещения и требований к надежности электроснабжения, а при подключении новых потребителей позволяет изменять структуру и параметры СБЭ в пределах одного кластера, не оказывая влияния на другие кластеры.

Для реализации алгоритма необходимо определить минимальное количество потребителей одного кластера ( $k$ ), а также радиусы зон обслуживания ИБП ( $r$ ). Формирование зон обслуживания ИБП позволит определить зону, в пределах которой будут выполняться требования по надежности электроснабжения и качеству электроэнергии для каждого потребителя. В связи с этим под зоной обслуживания ИБП следует понимать зону, в пределах которой потери в кабельных линиях не превышают допустимые, а требования по защите от токов однофазного короткого замыкания выполняются для каждого потребителя.

Кластеры формируются по исходным данным потребителей с учетом их мест размещения и требований к электроснабжению.

Для решения данной задачи разработана программа в *MatLab*. Работа программы заключается в выполнении следующего алгоритма.

### 1. Ввод (формирование) исходных данных:

– характеристики потребителей и требования, предъявляемые к надежности СЭС каждого из них (табл. 1), а также всех возможных отдельных групп, в состав которых входят одиночные потребители;

Таблица 1

### Характеристики потребителей ( $\xi_i$ )

№ п/п	Наименование потребителя	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$k_c$	$\cos \varphi$	$P_{\text{треб}}^{\text{СЭС}}$	Координаты потребителей	
						X	Y
$i = 1$	Потребитель 1	$P_{\text{ном}_1}$	$k_{c_1}$	$\cos \varphi_1$	$P_{\text{треб.1}}^{\text{СЭС}}$	$x_1$	$y_1$
$i = 2$	Потребитель 2	$P_{\text{ном}_2}$	$k_{c_2}$	$\cos \varphi_2$	$P_{\text{треб.2}}^{\text{СЭС}}$	$x_2$	$y_2$
...	...	...	...	...	...	...	...
$i = h$	Потребитель $h$	$P_{\text{ном}_h}$	$k_{c_h}$	$\cos \varphi_h$	$P_{\text{треб.}h}^{\text{СЭС}}$	$x_h$	$y_h$

– технические и экономические характеристики (параметры) ИБП, планируемых к установке [ряд номинальных мощностей ( $P_{\text{ном}}$ ) и соответствующие стоимости ( $C_{\text{ИБП}}$ ), вероятность безотказной работы ( $P_{\text{ИБП}}$ )] (табл. 2);

Таблица 2

Характеристики (параметры) ИБП ( $B_j$ )

№ п/п	Наименование ИБП	Номинальная мощность ИБП $P_{ном}$ , кВт	Стоимость ИБП $C_{ИБП}$ , тыс. руб	Вероятность безотказной работы ИБП $P_{ИБП}$
$j = 1$	ИБП 1	$P_{ном1}$	$C_{ИБП1}$	$P_{ИБП1}$
$j = 2$	ИБП 2	$P_{ном2}$	$C_{ИБП2}$	$P_{ИБП2}$
...	...	...	...	...
$j = l$	ИБП $l$	$P_{номl}$	$C_{ИБПl}$	$P_{ИБПl}$

– данные, необходимые для организации вычислительного процесса: стоимость электрической энергии ( $C_{ее}$ ), значение коэффициента запаса мощности ( $k_3$ ), вводимого для обеспечения устойчивой работы СЭС, с учетом предполагаемого развития системы и наращивания мощности потребителей, а также вероятность отказа ДГУ, обеспечивающей работу СБЭ от автономного источника питания ( $q_{ДГУ}$ ).

## 2. Преобразование исходных данных.

Определяется количество потребителей ( $i$ ), их активная мощность ( $P_{ном}$ ), коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ), коэффициент спроса ( $k_c$ ), требуемая вероятность безотказной работы ( $P_{треб}^{СЭС}$ ), а также координаты мест присоединения потребителей к СБЭ ( $X, Y$ ).

Координаты мест присоединения потребителей определяются относительно распределительного щита дублированного питания (ЩРДП), полагая, что координаты ЩРДП (0;0). В качестве базиса используется наименьшее расстояние между местами присоединения потребителей и ЩРДП.

## 3. Определение зон обслуживания ИБП.

Зоны обслуживания ИБП рассчитываются по исходным данным потребителей с учетом их требований к электроснабжению.

### 3.1. Определение значений расчетного тока.

Для однофазных потребителей

$$I_p = \frac{P_{ном}}{U_{\phi} * \cos\varphi}, \quad (3)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность потребителей, кВт;

$U_{\phi}$  – фазное напряжение, В;

$\cos\varphi$  – коэффициент мощности.

Для трехфазных потребителей

$$I_p = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} * U_{л} * \cos\varphi}. \quad (4)$$

**3.2. Выбор сечения кабельных линий** по таблице допустимых длительных токов (табл. 1.3.4–1.3.33 из ПУЭ) при условии

$$I_p \leq I_d. \quad (5)$$

### 3.3. Определение допустимой длины кабельных линий по потерям напряжения.

Потери в кабельных линиях напряжением до 1000 В в электроустановках зданий не должны превышать  $U_{доп} = 4\%$ :

$$\Delta U_{\%} = \frac{2 * 100 * P_{ном}}{U_H^2} * \frac{\rho l_{доп}}{F}; \quad (6)$$

$$l_{доп} = \frac{U_H^2 * F * \Delta U_{\%}}{2 * 100 * \rho * P_{ном}}, \quad (7)$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность, кВт;

- $l_{\text{доп}}$  – допустимая длина кабельной линии, м;  
 $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение, В;  
 $\rho$  – удельное сопротивление материала токоведущих жил, для алюминия  $31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ , для меди  $18,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ ;  
 $F$  – выбранное сечение токоведущей жилы,  $\text{мм}^2$ .

Если  $\Delta U_{\%} > U_{\text{доп}}$ , то необходимо увеличить сечение провода до величины, при которой условие не будет выполняться.

#### 4. Проверка по обеспечению защиты от токов однофазного короткого замыкания.

Для безопасной и устойчивой работы потребителей при питании от ИБП необходимо сравнить ток однофазного короткого замыкания ( $I_K^{(1)}$ ) на участках с величиной ограниченного тока ( $I_{\text{огр}}^{\text{ИБП}}$ ) ИБП:

$$I_K^{(1)} = \frac{U_{\text{ном.ИБП}}}{R_{\text{ph}} + R_{\text{PE}}}, \quad (8)$$

- где  $U_{\text{ном.ИБП}}$  – напряжение на шинах за ИБП, В;  
 $R_{\text{ph}}$  – сопротивление рабочего проводника, Ом;  
 $R_{\text{PE}}$  – сопротивление нулевого проводника, Ом;

$$I_{\text{огр}}^{\text{ИБП}} = \frac{1,5 * \sqrt{2} * P_{\text{ИБП}} * 1000}{U_{\text{ном.ИБП}}}, \quad (9)$$

где  $P_{\text{ИБП}}$  – мощность ИБП, кВт.

При выполнении условия  $I_K^{(1)} > I_{\text{огр}}^{\text{ИБП}}$  ИБП отключит неисправный участок.

По полученным данным рассчитывается радиус зон обслуживания ИБП для потребителей.

#### 5. Определение радиуса зон обслуживания ИБП для каждого потребителя.

Согласно работе [15] монтаж распределительных электрических сетей осуществляется строго в вертикальном или горизонтальном положении (т. е. запас 25–30%). Кроме того, при монтаже внутри зданий путем укладки кабеля «змейкой» достигается запас 5–10%, поэтому расчет радиуса зон обслуживания ИБП ( $R_{\text{ИБП}}$ ) для каждого потребителя определяется следующим выражением:

$$R_{\text{ИБП}} = 0,6 * l_{\text{доп}}. \quad (10)$$

#### 6. Формирование кластеров.

Полученные расчетные значения (табл. 3) позволяют сформировать кластеры.

Таблица 3

Расчетные значения потребителей для формирования кластеров

№ п/п	Наименование потребителя	Номинальная мощность потребителей, кВт	Коэффициент мощности	Расчетный ток, А	Сечение кабельной линии, $\text{мм}^2$	Допустимая длина кабельной линии, м	Радиус зоны обслуживания ИБП, м
$i$	Потребитель	$P_{\text{ном}}$	$\cos\varphi$	$I_{\text{р}}$	$S$	$l_{\text{доп}}$	$R_{\text{ИБП}}$
1	Потребитель 1	$P_{\text{ном}_1}$	$\cos\varphi_1$	$I_{\text{р1}}$	$S_1$	$l_{\text{доп1}}$	$R_{\text{ИБП1}}$
2	Потребитель 2	$P_{\text{ном}_2}$	$\cos\varphi_1$	$I_{\text{р2}}$	$S_2$	$l_{\text{доп2}}$	$R_{\text{ИБП2}}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$h$	Потребитель $h$	$P_{\text{ном}_h}$	$\cos\varphi_h$	$I_{\text{рh}}$	$S_h$	$l_{\text{допh}}$	$R_{\text{ИБПh}}$

Формирование кластеров начинается с потребителя с наибольшей активной мощностью ( $P_{НОМ}$ ). Проверка выполняется для каждого потребителя. Для потребителей, не попавших в первую зону, формируется новая зона, начиная с потребителя с наибольшей активной мощностью ( $P_{НОМ}$ ). При этом потребители первой зоны из рассмотрения исключаются (рис. 1).

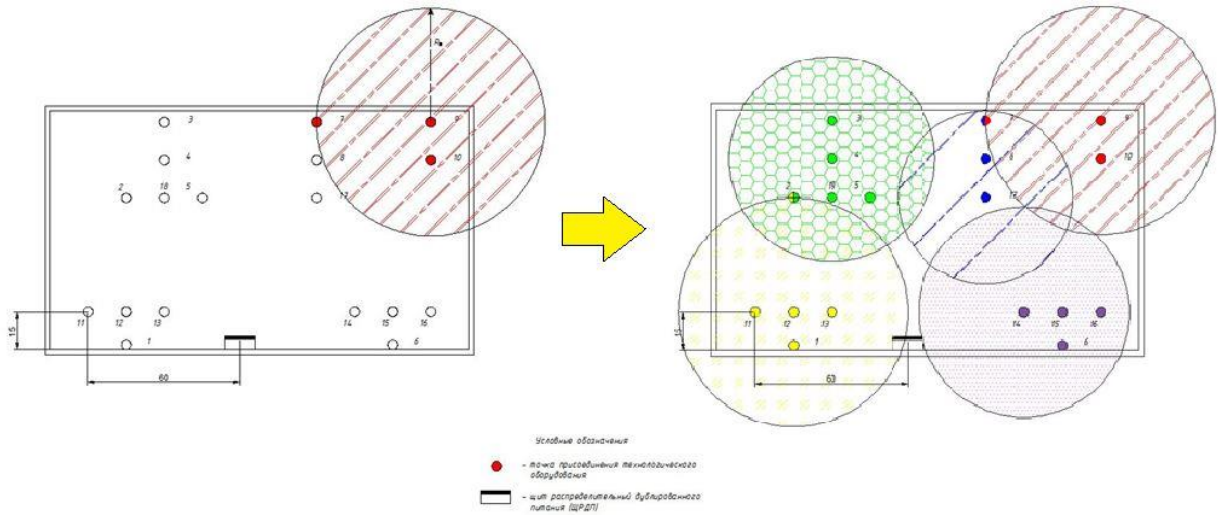


Рис. 1. Формирование кластеров

По расчетным данным с помощью разработанной программы определяются кластеры.

**7. Расчет значений вероятности безотказной работы СБЭ с учетом требований по надежности потребителей кластера.**

Для расчета используется система выражений, полученных на основе структурной схемы надежности СЭС потребителей особой группы I категории надежности электроснабжения,

$$\begin{cases}
 p_{\text{треб.1}}^{\text{СБЭ}}(t) = \frac{p_{\text{необх.}i}^{\text{СБЭ}}(t) (K_{Г.СБЭ} * (1 - q^{\text{СЭС СО}}(t) q^{\text{АИЭ}}(t)) p_z^{\text{РС}}(t) p_z^{\text{ИБП}}(t) p_{\text{из}}^{\text{ГС}}(t))}{(K_{ОГ})_i^{\text{СБЭ}}}; \\
 p_{\text{треб.2}}^{\text{СБЭ}}(t) = \frac{p_{\text{необх.}i}^{\text{СБЭ}}(t) (K_{Г.СБЭ} * (1 - q^{\text{СЭС СО}}(t) q^{\text{АИЭ}}(t)) p_z^{\text{РС}}(t) p_z^{\text{ИБП}}(t) p_{\text{из}}^{\text{ГС}}(t))}{(K_{ОГ})_i^{\text{СБЭ}}}; \\
 \dots \dots \dots \\
 p_{\text{треб.}i}^{\text{СБЭ}}(t) = \frac{p_{\text{необх.}i}^{\text{СБЭ}}(t) (K_{Г.СБЭ} * (1 - q^{\text{СЭС СО}}(t) q^{\text{АИЭ}}(t)) p_z^{\text{РС}}(t) p_z^{\text{ИБП}}(t) p_{\text{из}}^{\text{ГС}}(t))}{(K_{ОГ})_i^{\text{СБЭ}}}.
 \end{cases} \tag{11}$$

где  $p$  – вероятности безотказной работы,  
 $q$  – вероятности отказа,  
 $K_{Г.СБЭ}, K_{ОГ}$  – коэффициенты готовности и оперативной готовности СБЭ.

**8. Формирование допустимых вариантов построения СБЭ.**

Для формирования множества допустимых вариантов построения СБЭ в качестве переменных, подлежащих определению в ходе решения оптимизационной задачи, введем в рассмотрение следующие переменные:

$$\begin{aligned}
 & \text{вариант построения СБЭ, при котором } i\text{-й} \\
 x_{ijn} & \text{ – потребитель (группа потребителей) получает} \\
 & \text{питание от } n \text{ работающих основных } j\text{-х ИБН;} \\
 & \text{вариант построения СБЭ, при котором } i\text{-й} \\
 x_{ijk} & \text{ – потребитель (группа потребителей) получает} \\
 & \text{питание от } k \text{ работающих резервных } j\text{-х ИБН.}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Указанные переменные введем при следующих допущениях:

- капитальные вложения в СБЭ включают в себя стоимость ИБП, а также стоимость кабельных линий между потребителями и ИБП;
- предусматривается параллельная работа основных ИБП только одной мощности;
- предусматривается параллельная работа резервных ИБП только одной мощности;
- предусматривается возможность параллельной работы не более шести ИБП;
- принятые переменные являются булевыми.

Введенные переменные и допущения позволяют определить математическую модель структурно-параметрической оптимизации СБЭ, в состав которой входит целевая функция и система ограничений.

### 8.1. Составление целевой функции.

Составление целевой функции оптимизационной задачи позволит определить допустимые варианты построения СБЭ в кластере (табл. 4) с учетом требований потребителей к надежности, где в качестве критерия оптимальности использована суммарная стоимость затрат на построение и эксплуатацию СБЭ (2).

Целевая функция может быть представлена как

$$X_i^* = \operatorname{argmin}_{X \in D} Z_i(X). \quad (13)$$

Таблица 4

Допустимые варианты построения в кластере

№ п/п	Потребитель (группа)											
	<i>i=1</i>							<i>i=2</i>	...	<i>i=h</i>	...	<i>i=g</i>
	Количество основных ИБП				Количество резервных ИБП			...	...	...	...	...
	<i>n=1</i>	<i>n=2</i>	...	<i>n=m</i>	<i>k=1</i>	...	<i>k=m-1</i>	...	...	...	...	...
1	0	0	0	0	0	0	0	...	...	...	...	...
2	0	1	0	0	1	0	0	...	...	...	...	...
3	0	0	0	0	0	0	0	...	...	...	...	...
...	0	0	0	0	0	0	0	...	...	...	...	...
<i>q</i>	0	0	0	0	0	0	0	...	...	...	...	...

Целевая функция (вектор затрат  $Z_t$ ), состоящий из суммарной стоимости затрат на построение и эксплуатацию СБЭ, может быть представлен как

$$Z_i(X) = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^l \sum_{z=1}^n l_{iz} b_{zj} (K_i(X) + R_i(X)) + \sum_{i=1}^h \sum_{z=1}^n l_{iz} C_{iz}^L \rightarrow \min_{X \in D}, \quad (14)$$

где  $K_i(X), R_i(X)$  – капитальные и годовые приведенные затраты на построение и эксплуатацию СБЭ  $i$ -го потребителя (группы потребителей), руб.;

$X$  – множество переменных, определяемых выражением (12);

$D$  – множество допустимых вариантов построения СБЭ.

Капитальные затраты определяются выражением

$$K_i(X) = \sum_{j=1}^l c_j \left( \sum_{n_i=1}^m n_i x_{ijn} + \sum_{k_i=1}^{m-1} k_i x_{ijk} \right), \quad (15)$$

где  $m$  – максимальное количество ИБП, шт.;

$c_j$  – стоимость  $j$ -го ИБП ( $j \in 1, 2, \dots, l$ ), руб.;

- $n_i$  – количество основных ИБП  $i$ -го потребителя (группы потребителей), шт.,  $n_i \in 1, 2, \dots, m$ ;
- $k_i$  – количество резервных ИБП  $i$ -го потребителя (группы потребителей), шт.,  $k_i \in 1, 2, \dots, m - 1$ .

Годовые приведенные затраты могут быть представлены в виде

$$R_i(X) = C_{\Pi_i}^{\text{СБЭ}}(X) = p_{\Sigma} K_i(X) + C_{\Pi_i}(X) = p_{\Sigma} K_i(X) + C_{\Pi_i}^{\text{ИБП}} + C_{\Pi_i}^{\text{КЛ}} =$$

$$= \left( p_{\Sigma} K_i + \tau_i C_{\text{ЭЭ}} P_{\text{рас}i} \left( \frac{100}{\eta(k_{\text{заг}i})} - 1 \right) + \beta \Delta W_i \right) \left( \sum_{n_i=1}^m n_i x_{ijn} + \sum_{k_i=1}^{m-1} k_i x_{ijk} \right), \quad (16)$$

- где  $C_{\Pi_i}^{\text{ИБП}}, C_{\Pi_i}^{\text{КЛ}}$  – стоимость потерь электроэнергии за год в ИБП и кабельных линиях  $i$ -го потребителя (группы потребителей), руб.;
- $C_{\text{ЭЭ}}$  – стоимость электроэнергии, руб./( $\text{kBт}\cdot\text{ч}$ );
- $\tau_i$  – время потерь для  $i$ -го потребителя (группы потребителей), определяемое из годового по продолжительности графика нагрузок, ч;
- $P_{\text{рас}i}$  – мощность потребителей, подключенных к ИБП, кВт;
- $k_{\text{заг}i}, \eta$  – коэффициенты загрузки и полезного действия ИБП, %;
- $\beta$  – удельные затраты на возмещение потерь в электрических сетях (определяется регионом), руб./( $\text{Mвт}\cdot\text{ч}$ );
- $\Delta W_i$  – потери электроэнергии в кабельных линиях (годовые),  $\text{Mвт}\cdot\text{ч}$ .

## 8.2. Формирование системы ограничений, накладываемых на переменные.

Систему ограничений можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{ijn}, x_{ijk} = \{0, 1\}, \\ \sum_{z=1}^m n S_z x_{ijn} \geq \frac{k_{c_i} k_{\text{Э}} P_{\text{НОМ}i}}{\cos \varphi_i}, \\ \sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^v x_{ijn} \leq 1; \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{v-1} x_{ijk} \leq 1, \\ \sum_{j=1}^m x_{ijn} - \sum_{j=1}^{m-1} x_{ijk} \geq 0, \\ (p_{\text{ИБП}}^n(t) - p_{\text{Треб}}^{\text{СБЭ}}(t)) \sum_{n=1}^v x_{ijn} + \sum_{n=1}^v \sum_{k_i=1}^{m-n_i} x_{ijk} \Delta p_{n/k}. \end{array} \right. \quad (17)$$

Первое выражение определяет значения переменных либо 0, либо 1. Второе выражение – необходимость обеспечения потребителей электроэнергией в необходимом количестве, где мощность основных ИБП должна быть не менее, чем заданная мощность потребителей ( $Pn$ ). Третье выражение определяет требование – для каждого потребителя (группы потребителей) предусмотрен только один вариант электроснабжения. Четвертое – основных ИБП должно быть не меньше, чем резервных. Пятое – вероятность безотказной работы СБЭ должно удовлетворять требованиям потребителей по надежности.

## 9. Определение оптимального варианта построения СБЭ внутри кластера.

**9.1. Составление целевой функции с учетом использованием полученных на предыдущих этапах значений экономического показателя  $Z_i(X_i^*)$  для каждого потребителя (группы потребителей).**

Для получения ее математической модели введем следующие переменные:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{потребитель подключен к СБЭ,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (18)$$

Критерий оптимальности, представляющий собой минимум суммарных экономических затрат на СБЭ всех потребителей кластера, можно представить в виде

$$Y = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^g Z_i(X_i^*) y_i, t = 1, 2, \dots, u, i = 1, 2, \dots, g. \quad (19)$$

### 9.2. Формирование системы ограничений.

Множество оптимальных вариантов построения СБЭ формируется следующими ограничениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_i = \{0,1\}, i \in (1, 2, \dots, g); \\ \sum_{i=1}^g k_{c_i} P_{\text{ном}_i} y_i = \sum_{i=1}^g k_{c_i} P_{\text{ном}_i}; \\ y_i + \sum_{t=1}^u y_t = 1, i \in (1, 2, \dots, g), t \in (1, 2, \dots, u). \end{array} \right. \quad (20)$$

### 9.3. Решение поставленной задачи булевой оптимизации методом «ветвей и границ».

Решение включает следующие операции: построение дерева ветвлений, вычисление нижней границы подмножества решений и отсеивание бесперспективных подмножеств.

Выполнение перечисленных основных операций метода, подробное описание которых представлено в работе [19], в результате приводит к оптимальному решению задачи.

Решением задачи структурно-параметрической оптимизации СБЭ кластера является вектор

$$Y_t(V_t^*) = \operatorname{argmin}_{Y \in \Omega} Z_{\Sigma}(Y), \quad (21)$$

где  $Z_{\Sigma}(Y)$  – суммарные экономические затраты (капитальные и приведенные годовые затраты на эксплуатацию) СБЭ кластера;

$\Omega$  – множество допустимых решений.

### 10. Формирование оптимального варианта построения СБЭ ОНКИ.

Оптимальный вариант построения СБЭ ОНКИ состоит из оптимальных вариантов построения СБЭ кластеров и представляется в виде

$$Y_k^S = \operatorname{argmin} \sum_{k=1}^s (Y_k^*). \quad (22)$$

Элементы этих множеств позволяют определить оптимальный вариант построения СБЭ по экономическому критерию, обеспечивающий заданный уровень надежности СЭС потребителей с минимальными значениями экономических затрат на строительство и эксплуатацию СБЭ ОНКИ.

### 11. Вывод результата решения.

Таким образом, методика определения конфигурации СБЭ ОНКИ (оптимального варианта построения) с применением алгоритма кластеризации, которую можно представить как две последовательно решаемые оптимизационные задачи и система бесперебойного электрообеспечения кластера, структура и параметры которой однозначно определены, является оптимальной.

Так как конфигурация СБЭ кластеров оптимальна, то и их комбинация является оптимальной, что соответствует принципу оптимальности топологических структур, когда оптимальные структуры в сумме дают также оптимальную структуру. Для примера на рис. 2



представлены результаты решения данной задачи в *Matlab* для 18 потребителей, которые образуют СБЭ, состоящую из пяти кластеров.

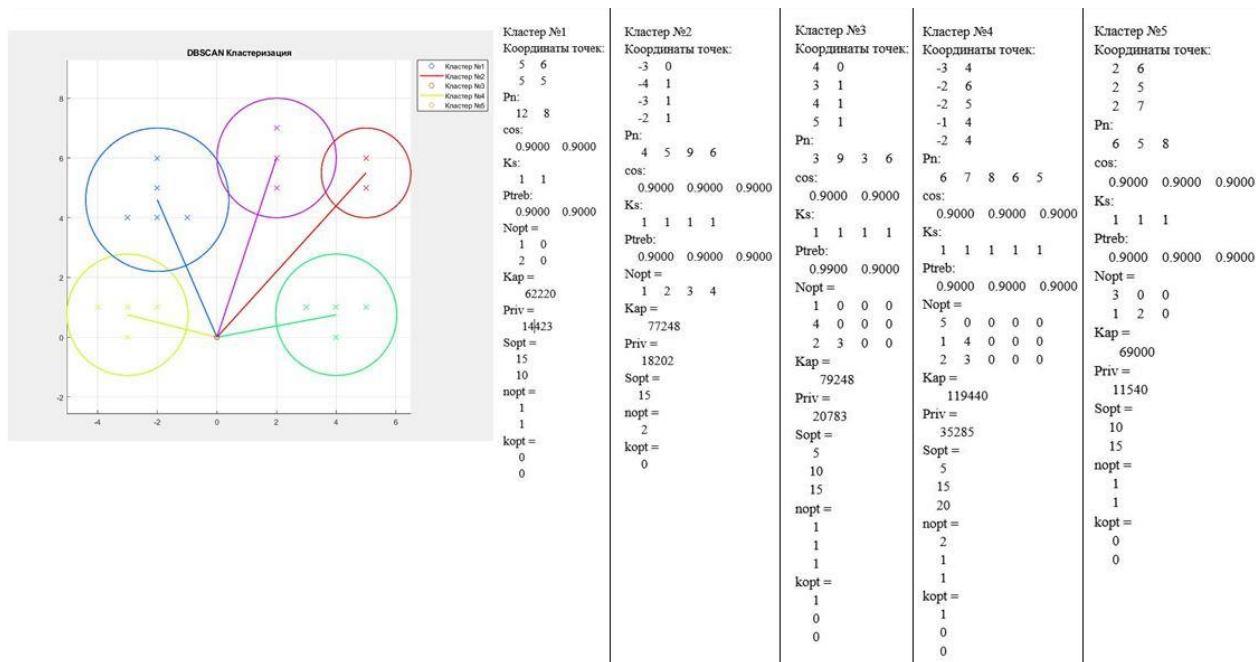


Рис. 2. Пример работы алгоритма структурно-параметрической оптимизации СБЭ для 18 потребителей

Блок-схема методики структурно-параметрической оптимизации СБЭ ОНКИ представлена на рис. 3, на котором:

- блок 3 задает начальное условие ( $S_k = 1$ ) для организации итерационного процесса для каждого кластера;
- блок 4 задает начальное условие ( $i = 1$ ) итерационного процесса внутри кластера для каждого потребителя;
- блок 7 определяет условие для остановки итерационного цикла ( $i = g$ ) формирования допустимых вариантов построения СБЭ для каждого потребителя (группы потребителей);
- блок 9 определяет условие остановки итерационного цикла ( $S_k = s$ ) формирования оптимального варианта построения СБЭ для каждого кластера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье рассмотрены особенности оптимизации СБЭ ОНКИ, предложена методика структурно-параметрической оптимизации СБЭ ОНКИ с применением модифицированного алгоритма кластеризации, реализованная с помощью программы в математическом пакете *Matlab*.

Разработанная программа позволяет учесть наиболее важные показатели эффективности СБЭ, определить оптимальный вариант построения СБЭ по условию экономичности, удовлетворяющий требованиям потребителей по надежности электроснабжения. Кроме того, применение алгоритма кластеризации позволяет упростить решение оптимизационной задачи за счет уменьшения ее размерности.

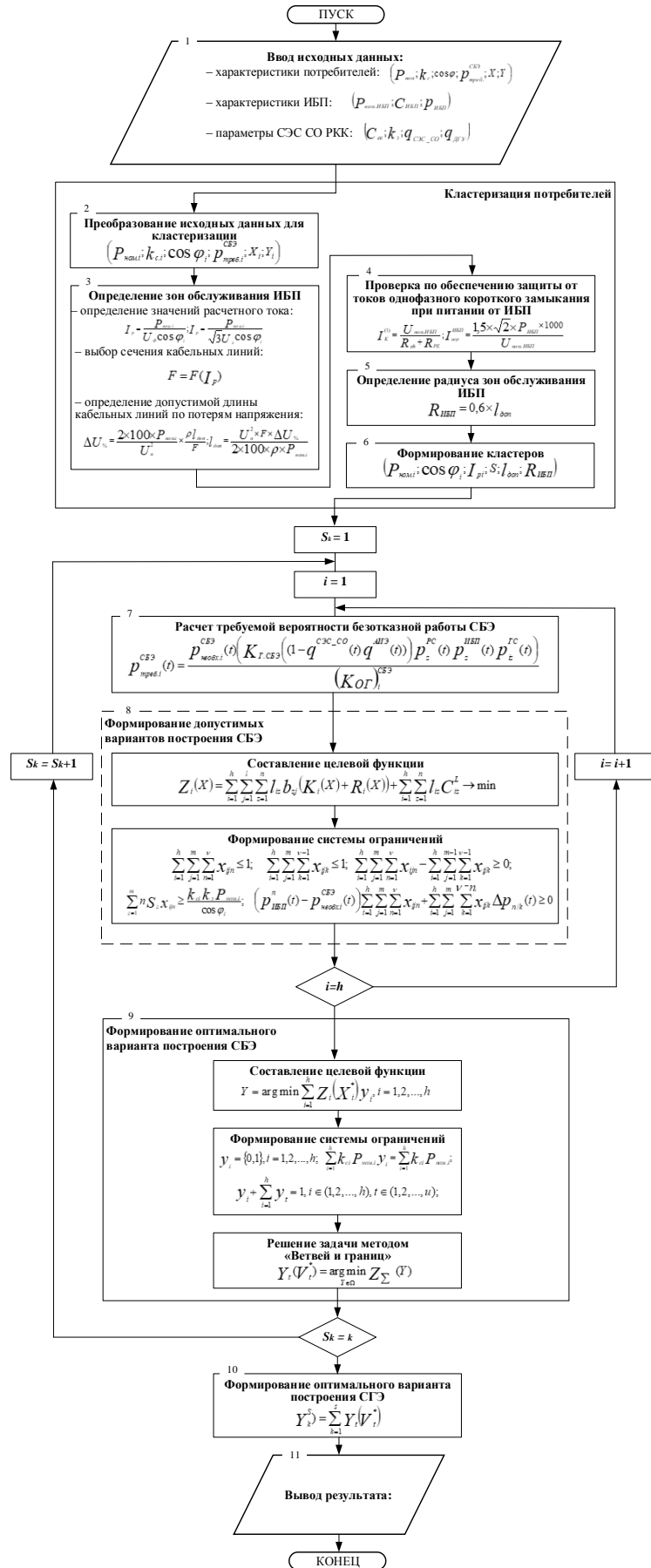


Рис. 3. Блок-схема методики структурно-параметрической оптимизации СБЭ ОНКИ

### Список используемых источников

1. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Н. И. Воропай [и др.]. – М. : ООО ИД «ЭНЕРГИЯ», 2013. – 212 с.
2. Карагодин В. В., Полянский К. А., Зверев А. В. Подходы к обеспечению электроснабжения ответственных потребителей специального объекта с заданным уровнем надежности // Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития систем внутреннего и автономного электроснабжения специальных объектов» / ВА РВСН имени Петра Великого. – 2015. – С. 113–119.
3. Тарасенко А. Б., Тетерина Н. В., Киселева С. В. Возможности оптимизации энергетического баланса островного поселения // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 05-06 (109-110). – С. 187–196.
4. Арзамасцев Д. А., Лунес А. В., Мызин А. Л. Модели оптимизации развития энергосистем : учеб. пособие / под ред. Д. А. Арзамасцева. – М. : Высш. шк., 1987. – 272 с.
5. Abdelaziz A., Hegazy Y., El-Khattam W. Othman M. A multi-objective optimization for sizing and placement of voltage-controlled distributed generation using supervised Big Bang-Big Crunch method // Electr. Power Compon. Syst. – 2015. – Vol. 43, № 1. – P. 105–117.
6. El-Fergany A. Optimal allocation of multi-type distributed generators using backtracking search optimization algorithm // Elsevier Ltd. Electrical power and energy systems journal. – 2015. № 64. – P. 1197–1205.
7. Аттетков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации : учебник для вузов. – Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 217 с.
8. Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Порядин Д. И. Оптимизация структуры системы электроснабжения на основе применения модифицированного симплекс-метода // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 688. – С. 99–104.
9. Список орбитальных космических запусков России. – URL: <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 02.03.2024).
10. Петухов Г. Б. Теоретические основы и методы исследования эффективности оперативных целенаправленных процессов : учеб. пособие. – МО СССР, 1979. – 176 с.
11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М. : Гос. изд-во физико-матем. литературы, 1958. – 464 с.
12. Гребенник И. В. Декомпозиция множества допустимых решений и экстремальные свойства целевых функций в задачах оптимизации с булевыми переменными // Радиоэлектроника и информатика : журн. – 2001. – № 3. – С. 93–99.
13. Головинский П. А., Шаталова А. О., Еникеев Э. И. Кластеризация данных : метод. указания к выполнению практ. работ по дисциплине «Машинное обучение с Python» по образовательной программе «Технологии искусственного интеллекта». – Воронежский гос. техн. ун-т, 2021. – 23 с.
14. Рылов С. А. Модельные данные для кластеризации. – URL: <https://drive.google.com/open?id=0ByK9GtU5ExExRnZwdFNmRHRWdFk> (дата обращения: 12.11.2023).
15. ГОСТ Р 50571.5.52-2011. Электроустановки низковольтные. – М. : Стандартинформ, 2013. – 72 с.
16. Салмин И. Д. Математические методы решения оптимизационных задач / под ред. В. В. Харитонова. – М. : МИФИ, 2004. – 156 с.

И. Г. Манухов

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ОЦЕНИВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье рассмотрен подход к оцениванию качества проведения испытаний сложных технических систем. Как характеристика качества проведения испытаний рассмотрена достоверность результатов испытаний. Данная характеристика вводится с целью определения степени соответствия измеренных (рассчитанных аналитически) показателей истинным характеристикам опытного образца изделия. Решением такой задачи является определение доверительного интервала оценок измеренных параметров. Указанный подход позволяет повысить точность оценивания технических характеристик испытываемого образца вооружения и военной техники для их последующего сравнения с техническими характеристиками, установленными в тактико-техническом задании на опытно-конструкторскую работу.

Ключевые слова: испытания сложных технических систем, достоверность проведения испытаний, среднеквадратическая ошибка, доверительный интервал, обработка ограниченного числа опытов.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит техническое перевооружение космических войск за счет создания высоконадежных унифицированных малосерийных изделий. Создание перспективных образцов вооружения и военной техники (ВВТ) не может быть осуществлено без тщательных и всесторонних испытаний, являющихся основным источником достоверной информации о результатах разработки и степени готовности создаваемых изделий. По мере повышения требований к разрабатываемым образцам ВВТ, роль испытаний в процессе создания вооружения становится все более значимой. В процессе совершенствования военно-технических систем создаются уникальные средства, что в значительной мере усложняет процесс испытаний опытных образцов изделий.

Проблема подтверждения характеристик сложных технических систем при проведении испытаний усложняется, с одной стороны, большим количеством случайных факторов, оказывающих влияние на процессы функционирования технических систем; с другой стороны, – ограниченными возможностями по измерению физических характеристик, а также возможностью проводить большое количество экспериментов в рамках проведения испытаний [1–3]. Для того чтобы подтвердить эффективность функционирования объекта испытаний, необходима оценка технических характеристик испытываемого средства. Качество проведения испытаний характеризуют точностью, воспроизводимостью и достоверностью [4].

Высокая стоимость и большая длительность подготовки к проведению натурных испытаний сложных технических систем не позволяют получить достаточное количество статистического материала для оценки измеряемых параметров с высокой точностью. В данных случаях, как правило, имеется статистический материал ограниченного объема – до двух-трех десятков измерений [5]. Такого количества статистического материала обычно недостаточно для нахождения заранее неизвестного закона распределения интересующего параметра. Однако имеющийся материал может быть использован и обработан соответствующими статистическими методами с целью получения некоторой информации о случайной величине. Таким образом, на основе ограниченного числа экспериментов имеется возможность определить основные характеристики случайной величины: математическое ожидание и дисперсию, иногда – высшие моменты [6]. Нужно отметить, что любое значение параметра, которое было вычислено на основе ограниченного числа экспериментов, всегда будет содержать элемент случайности. Такое приближение – случайное значение называют *оценкой измеряемого параметра*.

Наиболее предпочтительным способом проведения испытаний сложных военно-технических систем являются натурные испытания [7]. При натуральных испытаниях возможно напрямую измерить необходимые параметры для оценки степени соответствия технических характеристик изделия заданным.

Таким образом, целью исследования является обоснование методического подхода к оцениванию характеристик сложных технических систем на основе ограниченного количества статистического материала, полученного при проведении натуральных испытаний [4].

## **МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВАНИИ МАЛОЙ ВЫБОРКИ**

Характеристики сложных технических систем могут быть представлены в виде случайных векторов, случайных функций или полей. Для анализа случайных величин требуется знать законы их распределения, которые наиболее достоверно можно получить на основе реализаций характеристик в серии натуральных экспериментов. Решение данной задачи осложняется следующими обстоятельствами [7, 8]:

- оценки реализаций оцениваемых характеристик в каждом эксперименте искажены погрешностями, законы распределения которых обычно неизвестны;
- погрешности могут изменяться от эксперимента к эксперименту вследствие использования различных средств измерений при различных условиях функционирования изделия;
- параметры характеристик сложных технических систем могут меняться в процессе проведения эксперимента по причине внесения изменений в конструкцию, технологию изготовления и порядок функционирования изделия;
- количество натуральных экспериментов для сложных технических систем ограничено.

Для решения задачи проведения испытаний в условиях, близких к реальным, предлагается применить математический аппарат, позволяющий получить оценки измеренных параметров с использованием ограниченного количества статистического материала [6, 9–11]. В данном случае в качестве показателя эффективности выступает достоверность оценки исследуемого параметра.

Статистическая обработка результатов испытаний производится в соответствии с рекомендациями МИ 1317-2004. Настоящий стандарт распространяется на нормативно-техническую документацию, предусмотренную ГОСТ 8.010-90 и регламентирующую методику выполнения прямых измерений с многократными независимыми наблюдениями, и устанавливает основные положения методов обработки результатов наблюдений и оценивания погрешностей результатов измерений.

В соответствии с рекомендациями при статистической обработке группы результатов наблюдений следует выполнить следующие операции [12]:

- исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений;
- вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения;
- вычислить оценку среднего квадратического отклонения результата наблюдения;
- вычислить оценку среднего квадратического отклонения результата измерения;
- проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению; вычислить доверительные границы случайной погрешности (случайной составляющей погрешности) результата измерения;
- вычислить границы неисключенной систематической погрешности (неисключенных остатков систематической погрешности) результата измерения;
- вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

Предположим, что  $\bar{x}$  соответствует истинному значению измеряемой величины, для экспериментальных исследований важно определить вероятность  $P$  того, что измеренные

значения лежат вблизи  $\bar{x}$ , т. е. в некотором интервале  $(\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x)$ , симметричном относительно  $\bar{x}$  (рис. 1).

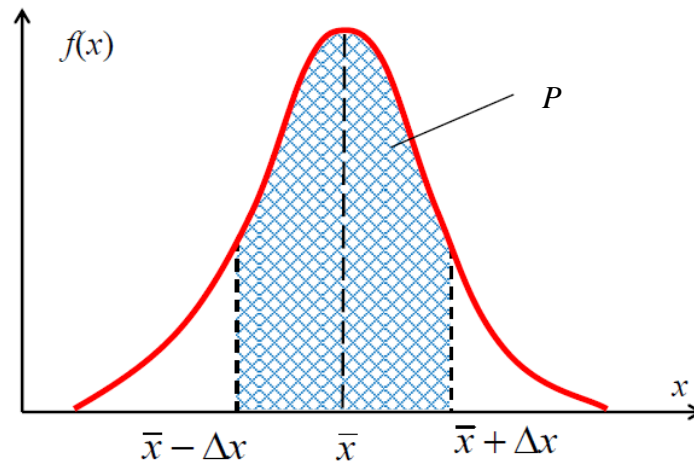


Рис. 1. Вероятность того, что измеряемая величина, подчиняющаяся нормальному распределению, лежит в интервале  $(\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x)$

Для такого интервала  $\Delta x$  принято считать его длиной. Как было показано ранее, вероятность  $P$  определяется как площадь под кривой функции распределения  $f(x)$  на соответствующем интервале и вычисляется путем интегрирования:

$$P = \int_{\bar{x} - \Delta x}^{\bar{x} + \Delta x} f(x) dx. \quad (1)$$

Значения вероятности того, что измеренная величина принимает значения в интервале, длина  $\Delta x$  которого пропорциональна  $\sigma$ , приведены в табл. 1. На рис. 2 представлены значения вероятности  $P$  для интервалов  $\pm\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$  относительно  $\bar{x}$  для нормального распределения.

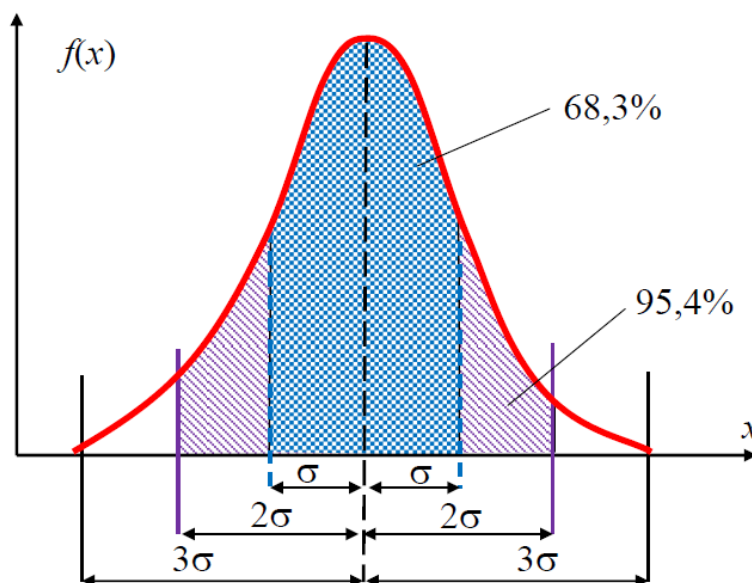


Рис. 2. Вероятность того, что измеряемая величина, подчиняющаяся нормальному распределению, лежит в интервалах  $\pm\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$  относительно  $\bar{x}$

Таблица 1

**Вероятность обнаружить измеряемую величину в заданном интервале значений**

Интервал $\bar{x} - k_\alpha \sigma \leq x \leq \bar{x} + k_\alpha \sigma$	Коэффициент $k_\alpha$	Вероятность $P$ , %
$\bar{x} - k_\alpha \sigma \leq x \leq \bar{x} + k_\alpha \sigma$	<b>1,00</b>	<b>68,3</b>
$\bar{x} - 1,282\sigma \leq x \leq \bar{x} + 1,282\sigma$	1,282	80,0
$\bar{x} - 1,44\sigma \leq x \leq \bar{x} + 1,44\sigma$	1,44	85,0
$\bar{x} - 1,645\sigma \leq x \leq \bar{x} + 1,645\sigma$	1,645	90,0
$\bar{x} - 1,96\sigma \leq x \leq \bar{x} + 1,96\sigma$	1,960	95,0
$\bar{x} - 2\sigma \leq x \leq \bar{x} + 2\sigma$	<b>2,00</b>	<b>95,4</b>
$\bar{x} - 2,577\sigma \leq x \leq \bar{x} + 2,577\sigma$	2,577	99,0
$\bar{x} - 2,81\sigma \leq x \leq \bar{x} + 2,81\sigma$	2,81	99,5
$\bar{x} - 3\sigma \leq x \leq \bar{x} + 3\sigma$	<b>3,00</b>	<b>99,7</b>
$\bar{x} - 3,292\sigma \leq x \leq \bar{x} + 3,292\sigma$	3,292	99,9

Из анализа табл. 1 видно, что существует взаимосвязь между длиной интервала  $\Delta x$  и вероятностью  $P$  получить в эксперименте значения измеряемой величины в этом интервале. Если длину интервала  $\Delta x$  выражать через среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ :  $\Delta x = k_\alpha \sigma$ , то можно утверждать, что коэффициент пропорциональности  $k_\alpha$  зависит от вероятности  $P$ . Чем больше вероятность  $P$ , тем больше интервал  $\Delta x$ , в котором находятся измеренные значения, следовательно, тем больше коэффициент  $k_\alpha$ .

Так как на результаты измерения влияет множество случайных независимых факторов, не все полученные в эксперименте результаты в равной мере могут достоверно характеризовать изучаемый процесс, явление или объект. Возможна ситуация, когда влияние сторонних факторов окажется настолько значительным, что измеренное значение нельзя считать относящимся к изучаемой физической величине. Вероятность, с которой в условиях данного эксперимента полученные экспериментальные данные можно считать надежными (достоверными), называют доверительной вероятностью или надежностью. Величина доверительной вероятности определяется характером производимых измерений.

Для определения доверительных границ погрешности результата измерения доверительную вероятность  $P$  принимают равной 0,95 [12]. В тех случаях, когда измерение нельзя повторить, помимо границ, соответствующих доверительной вероятности  $P = 0,95$ , допускается указывать границы для доверительной вероятности  $P = 0,99$  [12]. В особых случаях, например при измерениях, результаты которых имеют значение для здоровья людей, допускается вместо  $P = 0,99$  принимать более высокую доверительную вероятность.

Интервал длиной  $\Delta x$ , соответствующий доверительной вероятности  $P$ , называется доверительным интервалом.

Так как при фиксированных условиях эксперимента доверия заслуживают только результаты измерений, лежащие внутри доверительного интервала длиной  $\Delta x$ , то абсолютная погрешность этих значений измеряемой физической величины (абсолютное отклонение измеренного значения от истинного) не превышает длину доверительного интервала  $\Delta x$ . То есть абсолютная случайная погрешность серии экспериментальных измерений (абсолютная случайная погрешность многократных измерений) равна длине доверительного интервала  $\Delta x$ . Но для измеряемой величины, подчиняющейся нормальному распределению, абсолютная погрешность  $\Delta x = k_\alpha \sigma$  определяется не только среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  этой величины, но и доверительной вероятностью  $P$  данной серии экспериментов. Поэтому для характеристики абсолютной случайной погрешности

многократных измерений всегда используют два числа: величину доверительного интервала  $\Delta x$  и величину соответствующей ему доверительной вероятности  $P$ .

Таким образом, для достоверной оценки характеристик сложных технических систем космического назначения необходимо иметь доверительные границы с вероятностью  $P = 0,95$ .

В процессе подготовки к проведению испытаний осуществляется получение исходных данных. При этом формируется перечень оцениваемых параметров  $X = \{x_j(t), j = \overline{1, J}\}$ , где  $x_j(t)$  –  $j$ -й измеряемый в момент времени  $t$  параметр;  $J$  – общее количество измеряемых параметров.

Определяется временной интервал проведения измерений  $\Delta T = [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$ , где  $t_{\text{нач}}$  – время начала испытаний,  $t_{\text{кон}}$  – время конца испытаний. Производится разбиение времени проведения измерений на промежутки с заранее выбранным шагом  $T = \{t_k, k = \overline{1, K}\}$ .

В процессе проведения испытаний с заданной частотой измеряются параметры  $x_{jk}$ , которые при проведении математического моделирования рассчитываются с учетом известных погрешностей. Таким образом, набор измерений параметров составляет вектор  $X = \{x_{jk}, j = \overline{1, J}\}$ . Для того чтобы симитировать случайную помеховую обстановку, вводится поправка на отсутствие измерений с некоторой вероятностью  $P$ . При этом число информативных измерений станет  $N = P \cdot K$ , где  $K$  – количество полученных измерений, соответствующее количеству отсчетов времени. После этого формируется матрица измеренных параметров (либо сформированных модельных значений)

$$Z = \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_k \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{j1} & x_{j2} & \dots & x_{jk} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_k$  – моменты времени замеров параметров  $x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{jk}$ .

При моделировании процесса проведения испытаний необходимо учесть возможные пропуски замеров, которые неизбежны при проведении натуральных испытаний. Таким образом, сформируем новую матрицу  $Z^*$  с учетом пропусков замеров в те моменты времени, когда измерения не были получены  $X_j = \text{rand}(x=0)$ :

$$Z^* = \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_k \\ x_{11} & 0 & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{j1} & x_{j2} & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

После получения измеренных значений оцениваемого параметра производится статистическая обработка результатов испытаний. Данная задача сводится к обработке результатов, полученных в ограниченном количестве экспериментов. Полученные оценки измеренных параметров должны соответствовать следующим требованиям: несмещенности, состоятельности, эффективности. В общем случае оценки для математического ожидания  $\tilde{m}$  и дисперсии  $\tilde{D}$  рассчитываются по следующим формулам соответственно [6]:



$$\tilde{m} = \frac{\sum_{n=1}^n x_n}{n}, \quad (4)$$

где  $x_n$  – значение измеренного параметра в  $n$ -м опыте;

$n$  – количество проведенных опытов;

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{n=1}^n (x_n - \tilde{m})^2}{n-1}. \quad (5)$$

Однако при малом количестве опытов оценка дисперсии не является несмещенной. Из-за этого при обработке результатов испытаний будет присутствовать некоторая систематическая ошибка, которая будет смещать результаты вычислений в меньшую сторону. Поэтому, чтобы ликвидировать данное смещение, вводят поправку для вычисления дисперсии:

$$\tilde{D} = \left( \frac{\sum_{n=1}^n x_n^2}{n} - \tilde{m}^2 \right) \cdot \frac{n}{n-1}. \quad (6)$$

Для решения задачи достоверного оценивания технических характеристик недостаточно будет вычислить для каждого параметра численное значение. Необходимо также оценить как его точность, так и надежность. То есть при проведении испытаний важно знать – с какой степенью уверенности можно ожидать, что ошибки измерений (случайные погрешности) не выйдут за установленные пределы.

Для того чтобы иметь представление о точности и надежности оценок измеренных характеристик, в математической статистике введены такие понятия, как *доверительный интервал*  $I$  и *доверительная вероятность*  $\beta$ .

Для количественной оценки достоверности полученных оценок на основе статистического материала, полученного при проведении испытаний, строится доверительный интервал (рис. 3) и выбирается доверительная вероятность. Принятая мера показывает, с какой вероятностью можно утверждать, что доверительный интервал «накрывает» истинное значение параметра.

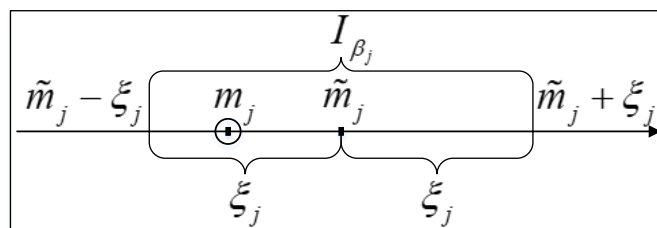


Рис. 3. К определению доверительного интервала оценки случайной величины

Для каждого  $j$ -го измеряемого параметра  $x_j$  по формуле (4) вычисляется его математическое ожидание  $\tilde{m}_j$  и по формуле (5) – дисперсия  $\tilde{D}$ .

Задача построения доверительного интервала сводится к нахождению максимального отклонения случайной величины, при которой доверительный интервал «накрывает» искомый измеряемый параметр  $m_j$  с заданной доверительной вероятностью.

Для того чтобы построить доверительный интервал, задают доверительную вероятность  $\beta_j$   $j$ -го оцениваемого параметра  $x_j$ , при котором выполняется условие

$$P(\tilde{m}_j - \xi_j < x_j < \tilde{m}_j + \xi_j) = \beta_j. \quad (7)$$

Значения  $\tilde{m}_j - \xi_j$ ,  $\tilde{m}_j + \xi_j$  являются доверительными границами. Тогда доверительный интервал для  $j$ -го оцениваемого параметра  $I_{\beta_j}$  определится как

$$I_{\beta_j} = (\tilde{m}_j - \xi_j; \tilde{m}_j + \xi_j), \quad (8)$$

где  $\pm \xi_j$  – максимальное отклонение исследуемой случайной величины.

Для наиболее точного вычисления доверительного интервала необходимо знать закон распределения оцениваемого параметра, что не всегда представляется возможным.

Согласно Центральной предельной теореме, в ряде случаев можно предположить, что случайная величина распределена по нормальному закону. Это связано с тем, что случайная составляющая оцениваемого параметра зависит от множества случайных факторов. Доказано, что в таком случае закон распределения случайной величины приближается к нормальному по мере увеличения количества случайных величин, функцией которых является исследуемый параметр. В таком случае случайная величина подчиняется закону распределения Стьюдента с  $n-1$  степенями свободы, плотность которого имеет вид

$$S_{n-1}(z) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{(n-1)\pi} \cdot \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \cdot \left(1 + \frac{z^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}}, \quad (9)$$

где  $\Gamma(x)$  – известная гамма-функция,

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} (u^{x-1} e^{-u}) du. \quad (10)$$

Таким образом, рассчитав по формулам (4) и (6) оценки математического ожидания  $\tilde{m}_j$  и дисперсии  $\tilde{D}_j$ , можно построить доверительный интервал с учетом распределения случайной величины по закону Стьюдента. Так как приходится иметь дело с ограниченным количеством испытаний, дисперсия оценки измеряемого параметра в точности неизвестна. Тогда в качестве ориентировочного значения дисперсии используются ее оценкой

$$\sigma_{\tilde{m}_j} = \frac{\sqrt{\tilde{D}}}{\sqrt{n}}. \quad (11)$$

Следовательно, доверительный интервал находится в границах

$$I_{\beta_j} = (\tilde{m}_j - z_j \sigma_{\tilde{m}_j}; \tilde{m}_j + z_j \sigma_{\tilde{m}_j}), \quad (12)$$

где  $z_j$  – величина, равная числу СКО, которые необходимо отложить от центра рассеивания, для того чтобы вероятность попадания оцениваемого  $j$ -го параметра была не ниже требуемой. При этом  $z_j$  вычисляется из условия

$$P(|\tilde{m}_j - m_j| < \xi_j) = \int_{-z_{\beta_j}}^{z_{\beta_j}} S_{n-1}(z) dz = \beta_j. \quad (13)$$

Так как  $S_{n-1}(t)$  – четная функция, выражение (13) можно представить в следующем виде:

$$2 \int_0^{z_j} S_{n-1}(z) dz = \beta_j. \quad (14)$$

Выражение (12) определяет величину  $z_j$  в зависимости от  $\beta_j$ , которую можно найти обратным интерполированием в таблице значений интеграла

$$\psi(x) = 2 \int_0^x S_{n-1}(z) dz. \quad (15)$$

Разработаны таблицы, в которых приведены значения величины стандартного отклонения  $z$  в зависимости от выбранной доверительной вероятности  $\beta$ , с учетом числа степеней свободы  $n-1$ .

Определив  $z_j$  по таблице значений интеграла (15) и полагая

$$\xi_j = z_j \sqrt{\frac{\tilde{D}_j}{n}}, \quad (16)$$

можно вычислить ширину доверительного интервала  $I_{\beta_j}$

$$I_{\beta_j} = \left( \tilde{m}_j - z_j \sqrt{\frac{\tilde{D}_j}{n}}; \tilde{m}_j + z_j \sqrt{\frac{\tilde{D}_j}{n}} \right). \quad (17)$$

Таким образом, доверительный интервал показывает, с какой точностью происходит измерение оцениваемого параметра сложной технической системы при заданном уровне доверия к этой оценке. С помощью математического моделирования проведения испытаний сложной военно-технической системы был получен массив данных, состоящий из двух последовательно проведенных измерений в одинаковых условиях. Данные, полученные при проведении испытаний, приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Значения измеренной характеристики сложной военно-технической системы при первом испытании**

Время получения измерения от начала проведения испытаний, с	Значение измеренной характеристики
0,12	2318,56
0,22	2550,37
0,45	0 (пропуск замера)
0,61	2644,68
0,78	0 (пропуск замера)
0,94	2705,19
1,15	2853,31
1,38	0 (пропуск замера)
1,66	3299,96
1,79	3702,76
2,05	3767,92
2,23	0 (пропуск замера)
2,59	3767,24
2,78	3806,80
2,99	3805,77
3,14	0 (пропуск замера)
3,41	3846,83

Таблица 3

**Значения измеренной характеристики  
сложной военно-технической системы при втором испытании**

Время получения измерения от начала проведения испытаний, с	Значение измеренной характеристики
0,32	0 (пропуск замера)
0,74	2870,34
1,03	0 (пропуск замера)
1,65	3836,14
2,00	0 (пропуск замера)
2,42	0 (пропуск замера)
2,87	3693,97
3,05	3787,78
4,12	3718,05
4,33	3665,27
4,96	2880,92
5,10	2880,78
5,30	0 (пропуск замера)
5,48	2778,81
6,01	2528,47
6,28	0 (пропуск замера)
6,54	2450,72
7,09	2377,08

В результате проведения испытаний были получены следующие результаты:

суммарное количество информативных замеров – 24 измерения;

математическое ожидание, рассчитанное стандартными статистическими методами,  $m$  – 2186,792;

дисперсия, рассчитанная стандартными статистическими методами – 2408591,025;

среднеквадратическое отклонение, рассчитанное стандартными статистическими методами,  $\sigma$  – 1551,963603;

оценка математического ожидания  $\tilde{m}$  – 3224,375652;

оценка дисперсии отклонения значения  $\tilde{D}$  – 316186,9;

оценка среднеквадратического отклонения  $\sigma_{\tilde{m}}$  – 562,3049884.

Пусть требуемая доверительная вероятность  $P_{\text{треб}} = 0,95$ . Тогда величина  $z_j$  находится обратным интерполированием в таблице значений интеграла (15) [16].

При доверительной вероятности – 0,95,  $z_j = 1,96$ .

Таким образом, доверительный интервал для обработки результатов проведения испытаний с использованием стандартных статистических методов находится в границах

$$I(0,95) = (-855,0566619; 5228,640662).$$

Наличие в левой части отрицательного значения неприемлемо для оценивания технических характеристик военно-технической системы. Это происходит в связи с большим отклонением измеренного параметра от среднего значения – в 139%.

Построенный доверительный интервал для обработки результатов проведения испытаний с использованием предложенного методического подхода находится в границах

$$I(0,95) = (2122,257875; 4326,493429).$$

Полученные значения разброса оцениваемого параметра соответствуют предъявляемым требованиям к обработке результатов испытаний и имеют отклонения в 34%.

Таким образом, предложенный методический подход к экспериментальному оцениванию технических характеристик сложных технических систем по ограниченному количеству испытаний позволяет достичь повышения точности на 105% за счет использования статистических методов обработки материала ограниченной выборки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В представленном подходе к оцениванию характеристик сложных технических систем использован математический аппарат статистической обработки результатов испытаний на основе ограниченного количества опытов. Согласно Центральной предельной теореме, вне зависимости от закона распределения исследуемой случайной величины (в данном случае закон распределения неизвестен), все выборки ограниченного объема будут распределены по нормальному закону. Ограничение для применения данной теоремы – распределение оцениваемого параметра должно обладать конечной дисперсией. Таким образом, результаты проведения испытаний подходят для их статистической обработки на основе теории обработки ограниченного числа опытов.

Полученные оценки характеристик подчиняются закону распределения Стьюдента. Размер доверительного интервала характеризует точность полученных оценок измеряемых параметров с заданной степенью доверия (достоверностью). Для получения оценок технических характеристик сложных военно-технических систем по ограниченному количеству измерений предлагается использовать математический аппарат, позволяющий за счет получения дополнительных поправочных коэффициентов скорректировать математическое ожидание и дисперсию оценок измеряемой характеристики. Значение доверительной вероятности, позволяющей с требуемой точностью оценить характеристики испытываемого образца вооружения, в рассматриваемом случае принято считать равным 0,95. С учетом заданной доверительной вероятности построены доверительные интервалы для результатов проведения испытаний с ограниченным количеством статистического материала. Использование предложенного методического подхода позволяет повысить точность оценивания технических характеристик на 105%.

Таким образом, представленный подход позволяет с требуемой (заданной) достоверностью оценить технические характеристики сложных технических систем, для которых накопление статистического материала с целью последующей обработки стандартными методами не представляется возможным, в силу сложности подготовки и проведения испытаний.

Разработанный научно-методический аппарат отличается от известных учетом ограниченности статистического материала, полученного в результате проведения испытаний сложных технических систем, и может быть использован при подготовке и проведении натурных испытаний и последующей статистической обработке полученных результатов.

## **Список используемых источников**

1. Основы испытаний сложных технических систем и объектов / под ред. д-ра техн. наук О. Ю. Аксёнова. – М. : АО «Издательский дом «Аргументы недели», 2020. – 480 с.
2. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 24 с.

2. *Арсеньев В. Н., Лоскутов А. И., Козырев Г. И.* Системы контроля и испытания вооружения и военной техники, военная метрология : электр. учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. *Бахвалов Ю. О.* Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность : учеб. пособие. – М. : ООО «АИР», 2015. – 228 с.
4. *Пузин Ю. Я., Сафронов С. Л.* Основы устройства и эксплуатации космических комплексов : учеб. пособие. – Самара : Изд-во Самарск. ун-та, 2022. – 236 с.
5. *Венцель Е. С.* Теория вероятностей. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
6. Основы теории испытаний. Экспериментальная отработка ракетно-космической техники / В. А. Лисейкин [и др.]; под ред. д-ра техн. наук В. А. Чванова. – М. : Машиностроение-Полет. Виарт Плюс, 2015. – 262 с.
7. *Кравченко Н. С., Ревинская О. Г.* Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме : учеб. пособие / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Изд. второе. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2017. – 121 с.
8. *Мудров В. И., Кушко В. Л.* Методы обработки измерений. Квазиправдоподобные оценки. – М. : Радио и связь, 1983. – 304 с.
9. *Платонов А. К., Иванов Д. С.* Методы обработки измерений : учеб. пособие. – М. : МФТИ, 2013. – 107 с.
10. *Феллер В.* Введение в теорию вероятностей и ее приложения : пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – Т. 2. – 738 с.
11. МИ 1317-2004. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. – М. : ВНИИМС, 2004. – 50 с.
12. МИ 2175-91. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения. Оценивание погрешностей. – М. : ВНИИМС, 1997. – 55 с.
13. *Манухов И. Г.* Модель измерительного канала «Квантово-оптическая система – искусственный спутник Земли» // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. – 2024. – № 1. – С. 81–86.
14. *Гмурман В. Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике : учеб. пособие для студентов вузов. – 9-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2004. – 404 с.

А. Н. Миронов,  
*доктор технических наук, профессор;*  
А. И. Петухов;  
П. А. Степанов;  
А. Э. Султанов,  
*кандидат технических наук*

## **МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЗАПАСА ПРОДОЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ СТУПЕНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЗКОПОЛОСНОГО ФИЛЬТРА**

Представлены результаты исследований возможности применения узкополосного фильтра для оценивания запаса продольной динамической устойчивости ракет-носителей (РН) схемы «тандем» путем сегрегации полигармонического сигнала для идентификации частот и форм продольных колебаний корпуса РН. Указаны преимущества компьютерных динамических моделей в сравнении с классическими методами оценки устойчивости при учете нелинейных обратных связей. Представлена методика анализа устойчивости многоконтурной динамической системы «жидкостный ракетный двигатель – корпус ракеты-носителя» по спектру матрицы с использованием узкополосного фильтра. Действенность изложенной методики продемонстрирована на примере анализа динамического взаимодействия топливной магистрали и корпуса РН.

Ключевые слова: узкополосный фильтр, продольные автоколебания корпуса РН, динамическая устойчивость.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вопросы обеспечения продольной динамической устойчивости ракет-носителей остаются актуальными для разработчиков ракетно-космической техники не одно десятилетие. Вместе с тем для современных средств выведения характерно повышение требований к стабильности уровня вибрационных нагрузок, возникающих при взаимодействии корпуса и двигательной установки на этапе выведения полезного груза. При этом данные требования должны реализовываться на «фоне» таких факторов, как расширение номенклатуры выводимого современными ракетами-носителями (РН) полезного груза (одного или нескольких космических аппаратов) и развитие ракетного двигателестроения.

Первый фактор сказывается на вариативности динамических характеристик корпуса ракеты космического назначения как совокупности РН и космической головной части (КГЧ) с полезным грузом. При этом, как отмечается в ряде работ [1, 2], при определенных условиях именно КГЧ, входящая в состав условной верхней части ракеты космического назначения (РКН) как колебательной системы при продольных колебаниях, способна существенно исказить первоначальную частотную характеристику колебательной системы и привести к изменению запаса продольной динамической устойчивости.

Второй фактор, связанный с характеристиками жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) с дожиганием генераторного газа, влияет на динамические характеристики второй составляющей колебательной системы «корпус РКН – двигатель» через взаимосвязь режимов его функционирования и амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ). Наличие в таких двигателях предкамерного газогенератора как динамического элемента с запаздыванием значительно усложняет вид АФЧХ, а также ее чувствительность к режимам работы двигательной установки. При этом для современных РН характерным становится использование

режимов глубокого дросселирования, в частности для снижения величины максимальной осевой перегрузки на этапе работы первой ступени РН [3].

Дополнительным фактором, способным снизить запас устойчивости к продольным автоколебаниям является расширение направлений модернизации РН. Так, например, модернизация РН «Ангара-А5» ведется в двух основных направлениях: повышении технологичности производства и снижении пассивной массы ракеты. Замена традиционных материалов (Д-16Т, АМг-6 и др.) в перспективных средствах выведения на новые композитные материалы и специальные алюминий-литиевые сплавы для корпуса РН (1460, В-1461, В-1469), а также применение сложных схем силового набора конструкции обечаек баков (цельнофрезерованных обечаек с силовым набором переменной геометрии) приводят к актуализации исследований динамической устойчивости РН.

Реализация новых подходов к оцениванию динамических характеристик их корпусов с учетом нелинейных эффектов позволит, принимая во внимание все вышеизложенное, обеспечить высокое конструктивное совершенство отечественных средств выведения при безусловном поддержании требуемого уровня надежности в условиях воздействия высокоамплитудных механических колебаний корпуса [4].

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ КАК КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Специфика рассматриваемого типа ракет-носителей с последовательной схемой соединения ступеней заключается в практически полной изоляции продольных колебаний от изгибных, связанных с действием таких факторов, как плескание топлива в баках и действием органов управления движением относительно центра масс. Эта особенность позволяет при исследовании продольной динамической устойчивости сосредоточиться на исследованиях характера взаимодействия упругого корпуса ракеты и двух основных элементов двигательной установки: топливных расходных магистралей, а также самого двигателя.

Одновременно с классическими методами описания устойчивости РКН как автоколебательной системы, базирующимися на линеаризованных моделях и использующих аппарат теории автоматического управления, в последние годы активно развиваются методы математического моделирования на основе динамических моделей. Это позволяет за счет методов численного интегрирования дифференциальных уравнений учесть множественные нелинейные эффекты, существенно влияющие на устойчивость системы. Результат моделирования в таком случае представляет собой множество характеристик временных параметров движения упругих элементов корпуса РН, а также параметров функционирования двигательной установки (ДУ) РН (давления, расходы и др.). Такие зависимости имеют вид полигармонических сигналов [5].

Структурно ракету космического назначения как динамическую колебательную систему с переменными массами можно представить двумя автоколебательными контурами, объединяющими три основных элемента: упругий корпус, топливные магистрали подачи окислителя и горючего в двигатель, сам маршевый двигатель (рис. 1).

Автоколебательная система представляет собой сложную динамическую систему, близкую к линейной, в которой запас продольной динамической устойчивости характеризуется декрементами затухания колебаний [6]. Автоматизация поиска ширины пропускания узкополосного фильтра для определения частот и форм продольных колебаний позволяет оптимизировать процесс поиска динамических звеньев и повысить точность расчета.





Рис. 1. Схема автоколебательных контуров при продольных колебаниях РКН

Математическая модель продольных автоколебаний описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка, формируемой на базе уравнения Лагранжа второго рода:

$$\ddot{x}_j + \frac{\delta_k \omega_k}{\pi} \dot{x}_j + \omega_k^2 x + \sum_{n=1}^2 K_{x_j s_n} \ddot{s}_n = \frac{U_j \delta \bar{P}}{M} \delta \bar{p}_k;$$

$$\ddot{s}_n + \frac{\delta_s \omega_s}{\pi} \dot{s}_n + \omega_s^2 s + \sum_{j=1}^m K_{s_n x_j} \ddot{x}_j = 0,$$

где  $x, s$  – обобщенные координаты колебаний корпуса и жидкости (топлива);  
 $U_j$  – формы колебаний ( $j = 1 \dots m$ );  
 $\delta \bar{P}, \delta \bar{p}_k$  – относительные вариации тяги и давления в камере двигателя.

Из системы уравнения видно, что при реализации двух и более доминирующих собственных частот колебаний корпуса становится важным оценивать и контролировать отдельные параметры жесткости корпуса, характеризующие распределение энергии колебаний по тонам.

Структура корпуса ракеты-носителя как колебательной системы показана на рис. 2. Видно, что в значительной степени частотные характеристики ракеты определяются параметрами упругоподвешенных масс. Доминирующими при этом являются массы окислителя и горючего первой ступени, составляющие более половины стартовой массы РН.

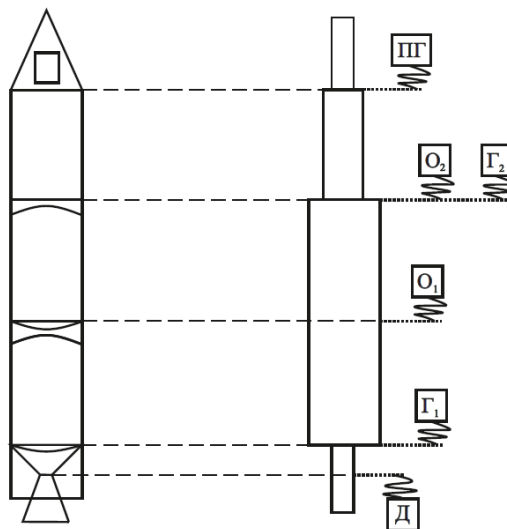


Рис. 2. Схема колебательной системы РН

Характер взаимодействия масс окислителя и горючего первой ступени и корпуса РН при выработке топлива предопределяет структуру низкочастотного спектра продольных колеба-

ний РКН в полете. Типичным является наличие двух смежных тонов колебаний с монотонно-возрастающими частотами в диапазоне от 7–8 Гц до 45–50 Гц. При этом в начальный период работы двигательной установки, частоты, как правило, сближаются до 2–3 Гц (рис. 3,а).

Целью анализа динамической устойчивости РКН к продольным автоколебаниям является определение областей неустойчивости в координатах «время – декремент колебаний» для каждого значимого тона (рис. 3,б). Снижение декремента колебаний на соответствующем тоне колебаний свидетельствует об уменьшении запаса продольной динамической устойчивости, а переход к отрицательным величинам – к потере устойчивости [7].

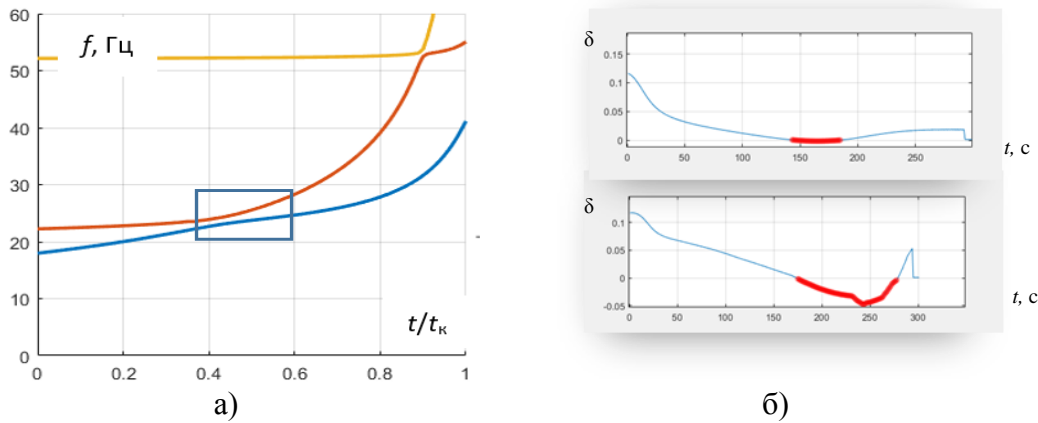


Рис. 3. Изменение во времени полета РКН ее динамических характеристик: а – низших тонов колебаний элементов колебательной системы «корпус – магистрали»; б – параметров затухания продольных колебаний

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ ГАРМОНИК ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Результаты моделирования продольных автоколебаний с использованием динамических моделей представляют собой полигармонический сигнал, вид которого показан на рис. 4.

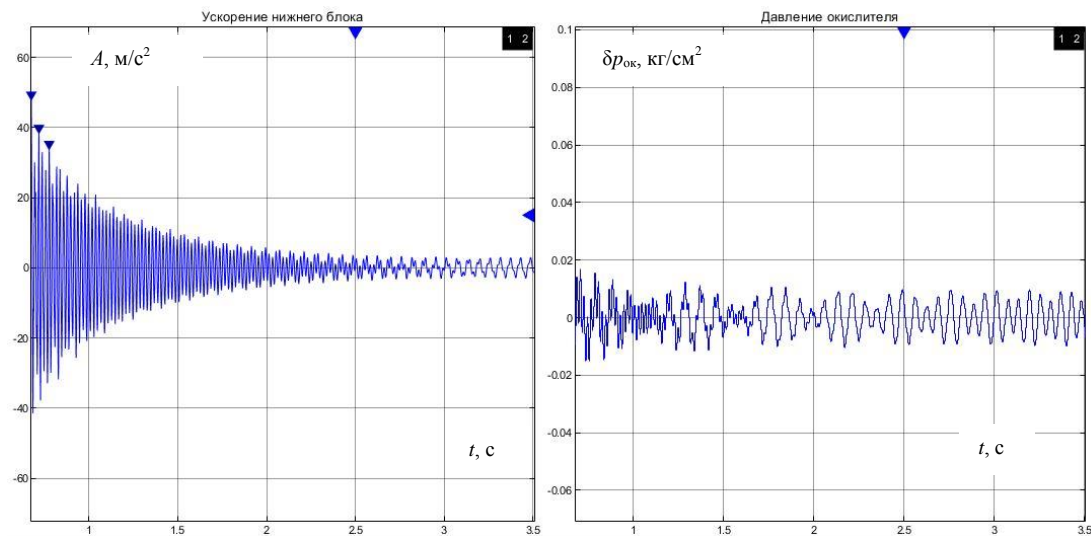


Рис. 4. Исходный полигармонический сигнал, полученный на основе динамической модели колебаний корпуса РН

Характер затуханий колебаний, воспроизводящих анализируемую динамическую систему «корпус РКН – двигатель» зависит от ее диссипативных свойств и отражает степень динамической устойчивости. В связи с тем, что устойчивость по различным тонам колебаний проявляется на разных этапах полета РН по-разному, возникает необходимость использования узкополосного фильтра для выделения отдельных гармоник. Анализ затухания колебаний по отдельным гармоникам дает информацию о степени динамической устойчивости системы [8]. Показателем в данном случае выступает логарифмический декремент затуханий, расчетная формула для которого имеет вид

$$\Delta = (1/N)\ln(A_i/A_{i+n}),$$

где  $N$  – число периодов колебаний на анализируемом участке сигнала;  
 $A_i, A_{i+n}$  – амплитуды колебаний в начальном и конечном участках сигнала.

Для автоматизации оценки декремента колебаний в ряде случаев удобно использовать огибающую сигнала (рис. 5).

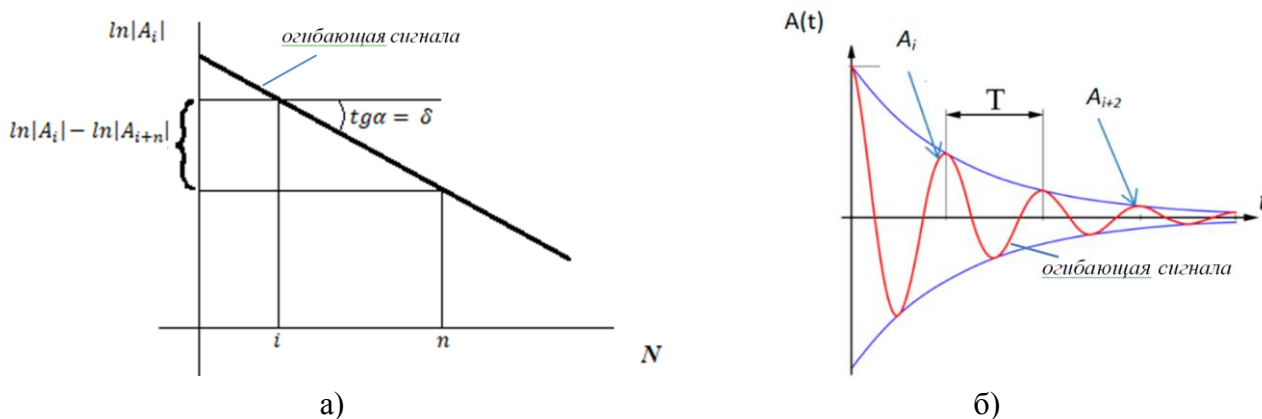


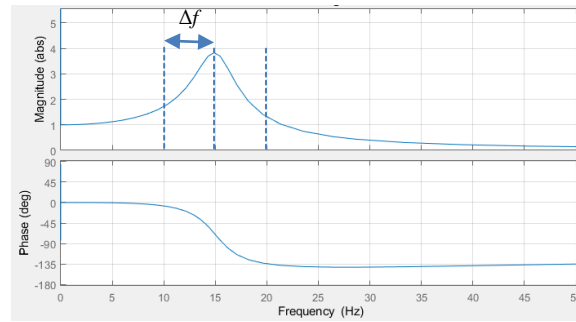
Рис. 5. Схема определения декремента затухания сигнала

Выражение для расчета декремента колебаний по огибающей сигнала имеет вид

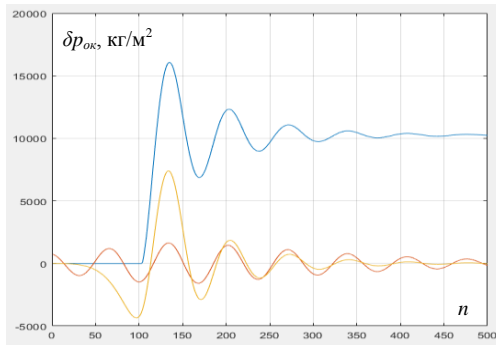
$$\delta = (\ln|A_i| - \ln|A_{i+N}|) / (N - i).$$

Применение узкополосных фильтров в задаче оценивания декрементов колебаний корпуса РН сталкивается с противоречием между необходимостью разделения смежных гармоник, расстояние между которыми может составлять не более 2-3 Гц, и проявлением эффекта насыщения фильтра, искажающего амплитуды временного сигнала. Для примера указанного эффекта рассмотрена модель колебаний топливной магистрали подачи в двигатель, имеющей определенную упругость. АЧХ и ФЧХ магистрали представлены на рис. 6,а. Таким образом, точность оценивания декремента затуханий полигармонического сигнала после применения узкополосного фильтра и выделения соответствующей гармоники, согласно рассматриваемому тону колебаний, напрямую зависит от таких параметров фильтра, как средняя частота  $f_{mi}$  окна и его ширина  $\Delta f_i$  (рис. 6,б).

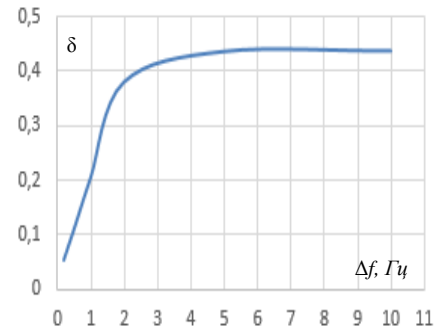
Методика оценивания запаса продольной динамической устойчивости включает в себя последовательность точечных оценок величины декремента колебаний на основе анализа осциллограмм сигналов (рис. 6,в), подвергнутых обработке узкополосными фильтрами. Оценивание должно проводиться для различных состояний динамической системы, соответствующих определенным моментам времени полета РН, и должно учитывать изменения параметров, зависящих от уровня топлива в баках.



а)



б)



в)

Рис. 6. Взаимосвязь величины оценки декремента затуханий и параметров окна фильтра

Параметры узкополосного фильтра должны учитывать с одной стороны удаленность частот колебаний смежных тонов, а с другой – минимальную ширину окна фильтра  $\Delta f_i$ , необходимую для минимизации искажения огибающей сигнала на основе которой определяется величина логарифмического декремента.

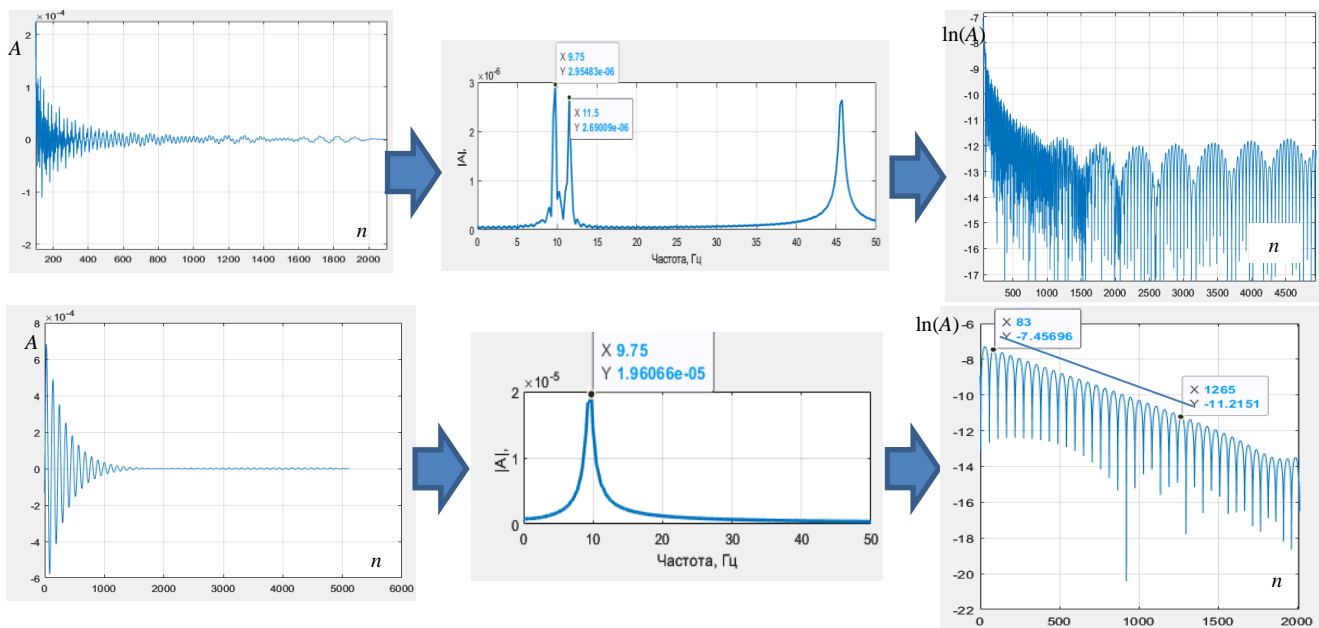


Рис. 7. Результат апробации методики оценивания декремента колебаний в случае близких по частотам двух смежных тонов колебаний

Методика оценивания запаса продольной динамической устойчивости (рис. 7) заключается в получении исходного полигармонического сигнала с использованием модели продольных автоколебаний ракеты-носителя [9], в последующем определении параметров узкополосного фильтра (средняя частота окна, ширина окна), в применении узкополосного фильтра по тонам колебаний ( $f_{1i}$ ,  $\Delta f_{1i}$ ;  $f_{2i}$ ;  $\Delta f_{2i}$  для времени  $t_i$ ), в проверке достижения заданной точности и последующем определении декрементов затуханий по выявленным тонам колебаний ( $\delta_{1i}$ ,  $\delta_{2i}$ ), что позволяет определить время ( $t_1 - t_2$ ), которое является областями снижения запаса продольной динамической устойчивости жидкостной ракеты-носителя с последовательным соединением ступеней.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена общая характеристика РКН как колебательной системы, пояснены особенности продольных колебаний для ракет-носителей с последовательным соединением ступеней. Выявлено, что применение узкополосных фильтров в задаче оценивания декрементов колебаний корпуса РН сталкивается с противоречием между необходимостью разделения смежных гармоник, расстояние между которыми может составлять не более 2-3 Гц, и проявлением эффекта насыщения фильтра, искажающего амплитуды временного сигнала. Таким образом, точность оценивания декремента затуханий полигармонического сигнала после применения узкополосного фильтра и выделения соответствующей гармоники, согласно рассматриваемому тону колебаний, напрямую зависит от таких параметров фильтра, как средняя частота  $f_{mi}$  окна и его ширина  $\Delta f_i$ .

Проведенные исследования позволяют отметить реализуемость метода оценивания запаса продольной динамической устойчивости ракет-носителей по декрементам осциллограмм колебаний отдельных гармоник. Применение узкополосных фильтров с шириной окна до 1 Гц обеспечивает с приемлемой точностью определение величины декремента с приведением осциллограммы к огибающей сигнала. Близкий к линейному характер огибающей логарифма сигнала при моделировании динамических систем с нелинейными связями ограниченной силы позволяет автоматизировать процесс обработки математического моделирования.

## Список используемых источников

1. Натанзон М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Don Elberg, Willie Costa Design of Rockets and Launch Vehicles. – М. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2022. – P. 669–675.
3. Рабинович Б. И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1975. – 416 с.
4. Особенности анализа телеметрической информации о перегрузке, получаемой при летной эксплуатации изделий ракетно-космической техники / А. Ю. Бондаренко [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – № 4(109). – С. 48–53.
5. Хоряк Н. В. Декомпозиция и анализ устойчивости динамической системы «питающие магистрали – маршевый ЖРД с окислительной схемой дожигания генераторного газа» по спектру матрицы // Техническая механика. – 2007. – № 1 – С. 28–42.
6. Хоряк Н. В., Николаев А. Д. Анализ устойчивости летательных аппаратов в условиях неполной информации // Динамика гидромеханических систем летательных аппаратов. – М. : Наука, 2022. – С. 10–18.

7. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617761. Программа расчета частот и форм продольных колебаний ракет-носителей на жидком топливе / А. И. Петухов, А. Э. Султанов. – Зарегистр. 03.04.2023.

8. *Лебедев Е. Л., Перфильев А. С., Султанов А. Э.* Анализ параметров вибрационного нагружения корпуса ракет-носителей как фактора повышения интенсивности выработки ресурса сварных соединений топливных баков // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 361–167.

9. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024613059. Программа расчета продольных колебаний корпуса ракеты-носителя с последовательным соединением ступеней / А. И. Петухов. – Зарегистр. 01.02.2024.

М. Р. Мицук<sup>1</sup>;

Н. А. Попов<sup>2</sup>,

*кандидат технических наук*

<sup>1</sup>ВИТ «ЭРА», г. Анапа.

<sup>2</sup>ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

## **МЕТОДИКА ДВУХУРОВНЕВОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Для повышения автономности и жизненного цикла сложных технических систем предложена методика оценки технического состояния и технического диагностирования малых космических аппаратов с использованием интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Особенность методики заключается в статистическом контроле стабильности изменяющихся значений диагностических параметров. Верификация разработанной методики проведена на данных моделирования работы системы обеспечения теплового режима малого космического аппарата.

Ключевые слова: малые космические аппараты, техническое диагностирование, интеллектуальная система, нейронная сеть, многослойный перцептрон, многоклассовая классификация, статистический контроль.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В условиях развития методов искусственного интеллекта (ИИ) и применения их в различных сферах науки и техники открываются новые возможности, в том числе и для космической отрасли. Одним из направлений внедрения методов ИИ в космической отрасли являются контроль технического состояния (ТС) и техническое диагностирование космических аппаратов (КА). Техническое диагностирование – определение ТС объекта [1]. Поскольку любой КА состоит из различных функциональных систем (ФС), то задача технического диагностирования сводится к определению ТС каждой ФС КА, в случаях возникновения нестандартных ситуаций (НШС) – поиска места и определения причин отказа (неисправности) ФС КА, прогнозирования ТС КА. При этом ТС диагностируемой системы – это состояние диагностируемой системы, характеризуемое совокупностью установленных в документации телеметрируемых параметров (ТМП), описывающих ее способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях [2].

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Разработка, создание и практическое использование малых космических аппаратов (МКА) – одно из основных направлений развития мировой и отечественной космонавтики. Благодаря их успешному функционированию на орбите, в настоящее время решается широкий спектр научно-исследовательских, социально-экономических, научно-образовательных и оборонных задач. Сокращенные сроки создания, сравнительно низкая стоимость выведения МКА на орбиту позволяют эффективно использовать их как в интересах органов государственного управления, так и для решения проблем регионального, отраслевого и корпоративного характера [3].

На сегодняшний день наблюдается тенденция перехода от управления каждым отдельным КА к управлению орбитальными группировками (ОГ) КА. Одним из ключевых направлений современной мировой космонавтики является разработка космических систем различного

назначения, состоящих из большого количества КА, с возможностью их пополнения путем замещения одного КА, утратившего функциональность, на другой – работоспособный КА или перевод его на ограниченное функционирование [4].

Одной из проблемных задач, возникающих при значительном увеличении численности ОГ МКА и сверхмалых КА (СМКА), является задача контроля ТС и технического диагностирования МКА и СМКА. Контроль ТС, поиск места и определение причин отказов (неисправностей), парирование НШС и прогнозирование ТС во время полетов КА различных типов и классов выполняются операторами (людьми) в наземном комплексе управления (НКУ) путем проведения анализа телеметрической информации (ТМИ), представленной в различных форматах отображения на программно-аппаратных комплексах. Несомненно, увеличение КА различных типов и классов приведет к серьезной нагрузке на НКУ и потребует привлечения новых операторов.

Проведенный анализ информационных источников показал, что в Российской Федерации ведутся исследования по разработке методов ИИ для решения задач контроля ТС и технического диагностирования КА [6–8]. Актуальность внедрения методов ИИ для решения задач контроля ТС и технического диагностирования КА различных типов и классов связана прежде всего с тем, что в Российской Федерации реализуется федеральный проект «Комплексное развитие космических информационных технологий» («Сфера»), включающий создание различных ОГ, состоящих преимущественно из МКА [5]. Для решения проблем, связанных с увеличением нагрузки на НКУ, при увеличении численности МКА и автоматизации процесса анализа ТС МКА, была разработана методика двухуровневого контроля ТС и диагностирования МКА. Отличием разработанной методики от существующих является возможность оценивать не только текущее ТС анализируемой системы, но и проводить анализ процессов изменений диагностических параметров (ДП) во времени, что позволяет прогнозировать развитие НШС до их появления.

Разработанная методика основывается на применении технологий машинного обучения – нейронных сетей (НС). Для выбора архитектуры НС, с целью решения задач классификации ТС ФС МКА, был проведен их анализ. Выделены преимущества и недостатки архитектур НС, и сделан вывод о выборе наиболее подходящей архитектуры. Результаты анализа архитектур НС представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Сравнительная характеристика различных архитектур нейронных сетей

Архитектура	Преимущества	Недостатки	Применимость для задачи классификации ТС ФС МКА
Многослойный персептрон (MLP)	Способность моделировать сложные нелинейные зависимости. Обработка большого количества признаков. Универсальность	Требуется большое количество данных для обучения. Сложная настройка гиперпараметров. Проблема интерпретируемости	Высокая применимость для задачи благодаря гибкости и возможности работы с различными типами данных и сложными зависимостями
Сверточная нейронная сеть (CNN)	Эффективна для анализа пространственных зависимостей и корреляций. Снижение количества параметров за счет сверточных слоев	Меньшая эффективность для неструктурированных данных. Ограниченная применимость для задач без явной структуры данных	Подходит слабо, так как задача не предполагает пространственных зависимостей (например, как в изображениях)



Окончание табл. 1

Архитектура	Преимущества	Недостатки	Применимость для задачи классификации ТС ФС МКА
Рекуррентная нейронная сеть (RNN)	Способность моделировать временные зависимости и последовательности. Подходит для данных с временной динамикой	Проблемы с долгосрочной зависимостью (исчезающий градиент). Сложность обучения и настройки	Подходит слабо, так как задача не связана с временными последовательностями или временной зависимостью данных
Сеть долгой краткосрочной памяти (LSTM)	Эффективность в моделировании длинных временных зависимостей. Решение проблемы исчезающего градиента	Высокая вычислительная сложность. Трудоёмкость настройки и обучения	Подходит слабо, так как основное внимание в задаче уделяется анализу признаков, а не временным последовательностям
Сеть глубокого обучения (Deep Learning)	Высокая способность обобщения и точности. Возможность работы с очень большими объемами данных и сложными архитектурами	Очень высокая вычислительная сложность. Необходимость большого объема данных. Проблемы интерпретируемости	Подходит для очень сложных задач, но избыточна для рассматриваемой задачи, если объем данных ограничен
Автокодировщик (Autoencoder)	Способен к обучению без учителя. Уменьшение размерности и устранение шума. Обнаружение аномалий	Сложность интерпретации выходных данных. Может не подходить для задач с четкими классами	Подходит слабо, так как задача требует четкой классификации, а не восстановления данных или обнаружения аномалий

Исходя из анализа данных табл. 1, можно сделать вывод, что многослойный перцептрон (MLP) является наиболее подходящей архитектурой для задачи классификации технического состояния сложного объекта. Он обеспечивает баланс между сложностью и точностью, обладает гибкостью для настройки под специфические требования задачи и способен работать с различными типами данных. Другие архитектуры, такие как CNN, RNN, LSTM и автокодировщик, менее подходят для данной задачи, поскольку их преимущества проявляются при решении других задач, таких как обработка изображений, временных рядов или уменьшение размерности.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения задачи определения вида технического состояния сложного технического объекта на основе многослойного перцептрона можно сформулировать следующую математическую постановку.

Дано:

$S = \{S_i | i = \overline{1, m}\}$  – множество модельных ТС;

$$P = D \cup L = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\} = \left\{ \begin{array}{l} \hat{\pi}_k \in D | k = \overline{1, t} \\ \check{\pi}_q \in L | q = \overline{1, y} = \overline{(t+1), n} \end{array} \right\} - \text{множество ДП (датчиков}$$

моделируемой ФС), где  $D$  – множество датчиков, измеряющих дискретные параметры,  $L$  – множество датчиков, измеряющих интервальные параметры;

$O = \{s_{ik}, l_{iq} | i = \overline{1, m}; k = \overline{1, t}; q = \overline{1, y}\}$  – множество модельных значений ДП (модельных дискретных и интервальных значений датчиков);

$\Phi: S \times P \rightarrow O$  – отображение, устанавливающее связь между элементами множеств  $O, S, P$ , согласно которому  $s_{ik} = \Phi(S_i, \hat{\pi}_k), l_{iq} = \Phi(S_i, \check{\pi}_q)$ .

Требуется:

1. Построить обучающую выборку  $D = \{(x^{(a)}, y^{(a)})\}_{a=1}^N$ ,

где  $x^{(a)} = [l_1^{(a)}, l_2^{(a)}, \dots, l_i^{(a)}, s_1^{(a)}, s_2^{(a)}, \dots, s_i^{(a)}]$  – вектор признаков для  $i$ -го ТС, а  $y^{(a)} \in S$  – соответствующее ТС.

2. Построить математическую модель многоклассового классификатора на основе MLP.

Необходимо разработать модель, которая будет принимать на вход вектор признаков  $x = [l_1, l_2, \dots, l_q, s_1, s_2, \dots, s_k]$ , где  $l_q$  и  $s_k$  – интервальные и дискретные значения, измеряемые датчиками. Модель должна вычислять вероятности принадлежности объекта к каждому из классов  $S_i$ . Это можно выразить как

$$\hat{y} = f(x; W, b), \quad (1)$$

где  $\hat{y}$  – вектор предсказанных вероятностей для каждого класса  $S_i, \hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_m]$ ;

$W$  – матрицы весов;

$b$  – векторы смещений;

$f(\cdot)$  – многослойная функция, представляющая архитектуру персептрона.

3. Формализовать задачу оптимизации для обучения модели, чтобы минимизировать ошибку классификации. Задача заключается в нахождении таких значений параметров  $W$  и  $b$ , которые минимизируют функцию потерь  $L(W, b): \min_{W, b} L(W, b)$ .

4. Оценить эффективность модели классификации ТС на основе MLP.

5. Провести анализ изменчивости значений признаков  $\pi_j$  для определения их значимости и влияния на результат классификации.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Разработанная методика предполагает выполнение следующих основных этапов.

**Этап 1.** Формирование обучающих данных на основе технической документации и ТМИ.

**Этап 2.** Обучение многоклассового классификатора на основе MLP каскадным методом.

**Этап 3.** Определение ТС контролируемой ФС на основе матричного метода.

**Этап 4.** Анализ изменчивости ДП с использованием подхода определения статистического процесса.

**Этап 5.** Принятие решений на основе сформированных знаний.

Этапом 1 методики является формирование обучающих данных.

Обучающие данные представим в виде обобщенной математической модели объекта диагностирования:

$$M_{\text{ОД}} = \langle S, P, O, \Phi \rangle \quad (2)$$

Обобщенную математическую модель объекта диагностирования удобно представить в виде табл. 2, которую иногда называют таблицей состояний [9].

Таблица 2

Таблица состояний объекта диагностирования

$S_i$	$\pi_j$			
	$\pi_1$	$\pi_2$	$\cdot$	$\pi_n$
$S_1$	$s_{11}/l_{11}$	$s_{12}/l_{12}$	$\cdot$	$s_{1t}/l_{1y}$
$S_2$	$s_{21}/l_{21}$	$s_{22}/l_{22}$	$\cdot$	$s_{2t}/l_{2y}$
$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
$S_m$	$s_{m1}/l_{m1}$	$s_{m2}/l_{m2}$	$\cdot$	$s_{mt}/l_{my}$

Основным отличием разработанной методики от существующих является возможность проводить контроль ТС и диагностирование МКА на двух уровнях. По строкам «горизонтали» (табл. 2) оценивается текущее ТС, по столбцам «вертикали» – изменчивость значений изменяемых параметров в некотором интервале времени. Количество последовательно оцениваемых значений для одного ДП, необходимых для достоверной оценки изменчивости процесса диагностирования, определяется эмпирическим путем либо экспертной оценкой.

На этапе 2 используем каскадный метод обучения многоклассового классификатора на основе MLP.

MLP принимает на вход вектор признаков  $x = [l_1, l_2, \dots, l_q, s_1, s_2, \dots, s_k]$ . Рассмотрим архитектуру MLP [10]. MLP состоит из нескольких слоев, каждый из которых выполняет линейные преобразования над входными данными, а затем применяет нелинейные функции активации для получения выходов. Пусть  $L$  – общее количество слоев в модели, включая входной и выходной слои.

На каждом слое  $l$  выход  $h^{(l)}$  вычисляется по следующей формуле:

$$h^{(l)} = f(W^{(l)}h^{(l-1)} + b^{(l)}), l = 1, 2, \dots, L, \quad (3)$$

где  $h^{(l-1)}$  – выход предыдущего слоя (для первого слоя  $h^{(0)} = x$ );

$W^{(l)}$  – матрица весов слоя  $l$ ;

$b^{(l)}$  – вектор смещений для слоя  $l$ ;

$f(\cdot)$  – функция активации (ReLU, сигмоида и т. д.).

Выходной слой MLP генерирует вектор  $\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_m]$ , где каждая компонента  $\hat{y}_c$  представляет собой предсказанную вероятность того, что объект принадлежит классу  $S_c$  ( $S_c = S_i$ ). Для этого применим функцию softmax – математическую функцию, широко используемую в машинном обучении и статистике, особенно часто в задачах классификации. Она преобразует вектор чисел в вектор вероятностей, сумма которых равна 1. Softmax позволяет интерпретировать результаты нейронной сети как вероятности принадлежности к различным классам [10]:

$$\hat{y}_c = \frac{\exp(z_c)}{\sum_{j=1}^m \exp(z_j)}; z = W^{(L)}h^{(L-1)} + b^{(L)}, \quad (4)$$

где  $z_c$  – линейная комбинация выходов последнего скрытого слоя  $h^{(L-1)}$  и соответствующих весов  $W^{(L)}$ ;

$m$  – количество классов (различных ТС).

Функция softmax гарантирует, что сумма всех элементов вектора  $\hat{y}$  будет равна 1, что позволяет интерпретировать их как вероятности.

Для повышения эффективности модели и адаптации ее сложности к задаче используется каскадный метод обучения [11]. Этот метод предполагает поэтапное усложнение архитекту-

ры MLP в процессе обучения, что позволяет избежать переобучения и улучшить точность классификации.

На первом этапе обучения используется базовая модель с минимально возможной архитектурой, например, с одним скрытым слоем и небольшим количеством нейронов. Если базовая модель показывает недостаточное качество классификации, проводится ее усложнение:

$$MLP^{(l+1)} \leftarrow MLP^{(l)} + \Delta MLP^{(l)}, \quad (5)$$

где  $MLP^{(l)}$  – модель на  $l$ -м этапе обучения;  
 $\Delta MLP^{(l)}$  – добавление нового слоя или увеличение числа нейронов в существующем слое.

Каждый раз, когда модель усложняется, новые параметры инициализируются так, чтобы сохранять информацию, выученную на предыдущих этапах:

$$W^{(l+1)} = W^{(l)} + \Delta W^{(l)}, \quad b^{(l+1)} = b^{(l)} + \Delta b^{(l)}, \quad (6)$$

где  $\Delta W^{(l)}$  и  $\Delta b^{(l)}$  – изменения в весах и смещениях, связанные с добавлением новых слоев.

**Формализация задачи оптимизации.** Для обучения многоклассового классификатора используется функция потерь на основе кросс-энтропии. Кросс-энтропия измеряет расхождение между истинными классами и предсказанными вероятностями модели. Она определяется как

$$L(W, b) = -\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N \sum_{c=1}^m y_c^{(a)} \log \hat{y}_c^{(a)}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество примеров в обучающей выборке;  
 $y_c^{(a)}$  – бинарная переменная, которая принимает значение 1, если объект  $a$  принадлежит классу  $S_i$ , и 0 – в противном случае;  
 $\hat{y}_c^{(a)}$  – предсказанная вероятность того, что объект  $a$  принадлежит классу  $S_c$ , вычисленная моделью.

С целью минимизации ошибки классификации, найдем  $\min_{W, b} L(W, b)$  с использованием метода градиентного спуска [10]. Данный метод итеративно обновляет параметры  $W$  и  $b$  в направлении антиградиента функции потерь, чтобы минимизировать ее значение. Для вычисления градиентов функции потерь по отношению к параметрам сети используется алгоритм обратного распространения ошибки, который работает совместно с градиентным спуском. На каждой итерации параметры обновляются следующим образом:

$$W^{(l)} \leftarrow W^{(l)} - \eta \frac{\partial L}{\partial W^{(l)}}, \quad b^{(l)} \leftarrow b^{(l)} - \eta \frac{\partial L}{\partial b^{(l)}}, \quad (8)$$

где  $\eta$  – коэффициент обучения (*learning rate*), который определяет размер шага при обновлении параметров;  
 $\frac{\partial L}{\partial W^{(l)}}$  и  $\frac{\partial L}{\partial b^{(l)}}$  – градиенты функции потерь по отношению к параметрам  $W^{(l)}$  и  $b^{(l)}$ .

**Оценка эффективности модели классификации ТС на основе MLP.** В задаче классификации ТС важно не только разработать и обучить модель, но и корректно оценить ее эффективность. Для этого используются различные метрики, которые позволяют количественно оценить качество предсказаний модели. Ключевыми метриками для оценки эффективности модели являются точность (*accuracy*) и полнота (*recall*). Эти метрики предоставляют комплексную оценку способности модели правильно идентифицировать и классифицировать различные технические состояния на основе входных данных.

**Точность.** Точность классификации представляет собой долю правильно классифицированных примеров среди всех примеров в наборе данных. Она позволяет оценить общую производительность модели, показывая, какую часть объектов модель распознала правильно вне

зависимости от того, к какому классу они принадлежат. Формально, в рамках текущей задачи, точность можно выразить следующим образом:

$$\text{точность} = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N 1 \left( \operatorname{argmax}_c \hat{y}_c^{(a)} = \operatorname{argmax}_c y_c^{(a)} \right), \quad (9)$$

- где
- $N$  – общее количество примеров в выборке;
  - $\hat{y}_c^{(a)}$  – предсказанная вероятность того, что объект  $a$  принадлежит классу  $S_c$ ;
  - $y_c^{(a)}$  – истинная метка класса для объекта  $a$ ;
  - $\operatorname{argmax}_c$  – оператор, возвращающий индекс класса с максимальной предсказанной вероятностью, что позволяет идентифицировать предполагаемый моделью класс для объекта  $a$ ;
  - $1(\cdot)$  – индикаторная функция, принимающая значение 1, если предсказанный моделью класс совпадает с истинным, и 0 – в противном случае.

**Полнота.** Полнота классификации, или *recall*, оценивает способность модели обнаруживать все объекты, принадлежащие определенному классу. Эта метрика является критически значимой в ситуациях, где особенно важно минимизировать пропуски объектов, относящихся к конкретным состояниям, например, при определении ТС, характеризующих отказы систем. Полнота для класса  $S_c$ , в рамках текущей задачи, формализуется следующим образом:

$$\text{полнота}_c = \frac{\sum_{a=1}^N 1(\operatorname{argmax}_c \hat{y}_c^{(a)} = c \text{ и } y_c^{(a)} = 1)}{\sum_{a=1}^N y_c^{(a)}}. \quad (10)$$

В числителе выражения находится количество правильно классифицированных объектов класса  $S_c$ , в знаменателе – общее количество объектов, которые действительно принадлежат классу  $S_c$  по истинным меткам. Полнота показывает, насколько хорошо модель распознает все объекты определенного класса, что особенно важно для задач, связанных с обнаружением редких или критических состояний.

Использование как точности, так и полноты позволяет получить более полное представление о качестве классификации, учитывая как общую правильность классификации (точность), так и способность модели находить все примеры определенных классов (полнота). Эти метрики дополняют друг друга и вместе позволяют оценить эффективность модели в контексте диагностических задач, где критически важно не только правильно идентифицировать нормальные и аномальные состояния, но и минимизировать риск пропуска потенциально опасных ТС.

Этап 3 основан на матричном методе определения ТС сложной системы [12].

Решение задачи сводится к следующему. В фиксированное временное сечение формируется вектор-строка текущих кодов значений параметров, которая подается на вход обученного многоклассового классификатора. На выходе получаем предсказание  $Y$ , которое является маркером ТС. Такой подход позволяет объективно оценить вклад каждого из ТМП в решение задачи определения ТС ФС и установления фактического режима функционирования МКА.

Этап 4 методики основан на подходе определения стабильности статистического процесса.

Для процессов, находящихся в состоянии статистической управляемости, появление результатов, не соответствующих требованиям, является событием редким и описывается такими моделями (законами) распределения, как закон биномиального распределения, закон распределения Пуассона (закон редких событий) [13].

Оценка изменчивости ( $v$ ) связана с вычислением на основе выборочных данных значений центральной (средней) линии и контрольных границ.

В фиксированное временное сечение формируется вектор-строка текущих кодов значений каждого ДП:  $\vec{\pi}_j = s_{1t}/l_{1y} \dots s_{mt}/l_{my}$ . Так как для каждого ТС известны диапазоны значений

ТМП, то рассчитаем их математическое ожидание  $\mu_{\pi_j}$  и стандартное отклонение  $\sigma_{\pi_j}$ . За центральную (среднюю) линию примем  $\mu_{\bar{x}}$ . Контрольные границы установим от  $-3\sigma_{\pi_j}$  до  $+3\sigma_{\pi_j}$  с интервалом  $\sigma_{\pi_j}$ . Если значения каждого ДП находятся в границах от  $-3\sigma_{\pi_j}$  до  $+3\sigma_{\pi_j}$  «исправного» ТС, то сильная изменчивость значений ДП не происходит случайно и является следствием ухудшения работы внутренних компонентов или влияния внешних факторов, что потенциально может привести к отказу контролируемой ФС.

Согласно закону распределения Пуассона, вероятность появления случайного события  $m$  раз в  $n$  испытаниях описывается формулой

$$P(n, m) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (11)$$

где  $P$  – вероятность появления случайного события;

$a$  – математическое ожидание числа  $m$ ,  $a = n * P$ .

О наличии особых причин указывают следующие случаи [14]:

- выход значений ДП за контрольные границы  $-3\sigma$  или  $+3\sigma$ ;
- серия из семи показаний по одну сторону от центральной (средней) линии;
- серия из семи последовательно убывающих или возрастающих значений (тренды);
- другие совокупности данных (циклы или другие закономерности), определенные эмпирическим путем.

Этапом 5 методики является принятие решений по результатам анализа параметров этапов 3 и 4 рассматриваемой методики. После определения ТС МКА и оценки изменчивости значений ДП следуют действия группы управления полетом, т. е. управление функционированием МКА по текущему плану полета или внесение изменений в план полета, исходя из сложившейся обстановки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Верификация методики проведена с помощью моделирования функционирования системы обеспечения теплового режима (СОТР) в служебных зонах МКА «Аист-2Д» – малого космического аппарата, предназначенного для проведения научных экспериментов, а также для отработки и сертификации целевой аппаратуры дистанционного зондирования Земли, обеспечивающей аппаратуры и их программного обеспечения для дальнейшего использования в перспективных разработках [15]. Анализ принципиальной электрической схемы СОТР позволил выделить 16 температурных зон служебных ФС. Каждая температурная зона является усредненным значением трех термодатчиков. Таким образом, всего 48 термодатчиков во всех служебных зонах. В соответствии с возможностями оценки процессов функционирования каждой служебной зоны СОТР, были определены четыре возможных технических состояния:

- 1) нормальная работа в ориентированном полете (ОП);
- 2) пониженная температура в одной из зон;
- 3) низкая температура в одной из зон;
- 4) высокая температура в одной из зон.

ТС «Нормальная работа в ОП» предполагает функционирование служебных агрегатов СОТР, в соответствии со значениями ТМП, в пределах их рекомендуемого температурного функционирования. ТС «Пониженная температура в одной из зон» характеризует значения ТМП, при которых срабатывают пленочные электронагреватели. ТС «Низкая температура в одной из зон» характеризует значения ТМП ниже минимального порога срабатывания пленочных электронагревателей. ТС «Высокая температура» характеризует значения ТМП выше предела рекомендуемого температурного функционирования служебных агрегатов СОТР.

В связи с тем, что для ТС «Повышенная температура» нет условных границ значений ТМП, такое ТС в работе не рассматривается.

На основе данных из технической документации для МКА была сформирована таблица соответствий ТС МКА с значениями температурных зон, описываемых соответствующей группой датчиков. Каждому ТС был присвоен свой идентификационный номер (маркер). В табл. 3 представлены соответствия ТС МКА со значениями температурных зон.

Таблица 3

**Технические состояния служебных частей СОТР МКА «Аист-2Д»  
и соответствующие им значения температурных зон**

№ ТС (маркер)	Место установки	АБ	УМВС	БАКУР	Стенка	ЛИАБ	Стенка	ЗП-31	ДОКА-Б	Стенка	Стенка	РПДУ	Стенка	Стенка	Стенка	Стенка	Стенка	
		-Y				+Z				+Y			-Z			+X		
		ДТ 1	ДТ 3	ДТ 4	ДТ 5	ДТ 6	ДТ 7	ДТ 8	ДТ 9	ДТ 11	ДТ 12	ДТ 13	ДТ 14	ДТ 15	ДТ 16	ДТ 17	ДТ 18	
3	Нормальная работа в ОП	[6;40]	[-4;40]	[6;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	[-4;40]	
5	Пониженная температура в одной зоне	[3;6]	[-7;-4]	[3;6]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	[-7;-4]	
26	Низкая температура в одной зоне	[-60;3]	[-60;-7]	[-60;3]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	[-60;-7]	
27	Высокая температура в одной зоне	[40;60]	[40;60]	[40;60]	[40;60]	[40;80]	[40;80]	[40;80]	[40;60]	[40;60]	[40;60]	[40;80]	[40;80]	[40;80]	[40;60]	[40;60]	[40;60]	

**Примечание.** Группы ДТ10, ДТ19-ДТ24 относятся к зонам целевого назначения.

В соответствии с этапом 2 предложенной методики, многоклассовый классификатор был реализован на основе многослойного персептрона Румельхарта с шестью скрытыми слоями. Реализация этапа 2 предложенной методики осуществлена на языке *Python 3.8* с помощью библиотеки *TensorFlow* [16]. Обучение осуществлялось с учителем. Всего было сформировано 13000 различных вариантов значений температурных групп, из них 10000 – использовались в качестве тренировочной выборки, 3000 – в качестве валидационной. Результаты обучения представлены на рис. 1 и 2.

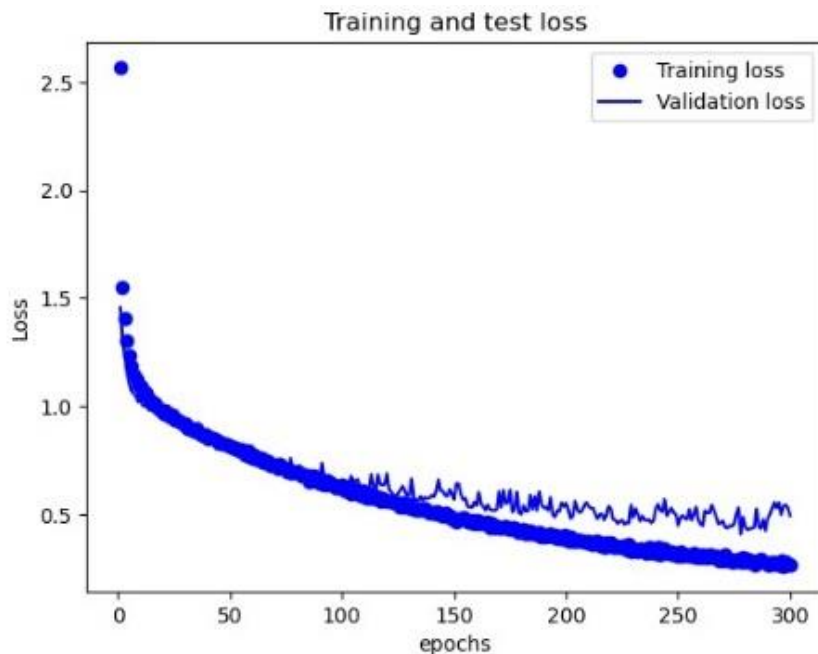


Рис. 1. График функции потерь обучения тренировочной и валидационной выборок

Как видно из рис. 2, максимальная точность тренировочной выборки 90%, валидационной выборки – 84%. Данный результат является недостаточным для выполнения реальных задач диагностирования и будет использован только в качестве апробации предложенной методики.

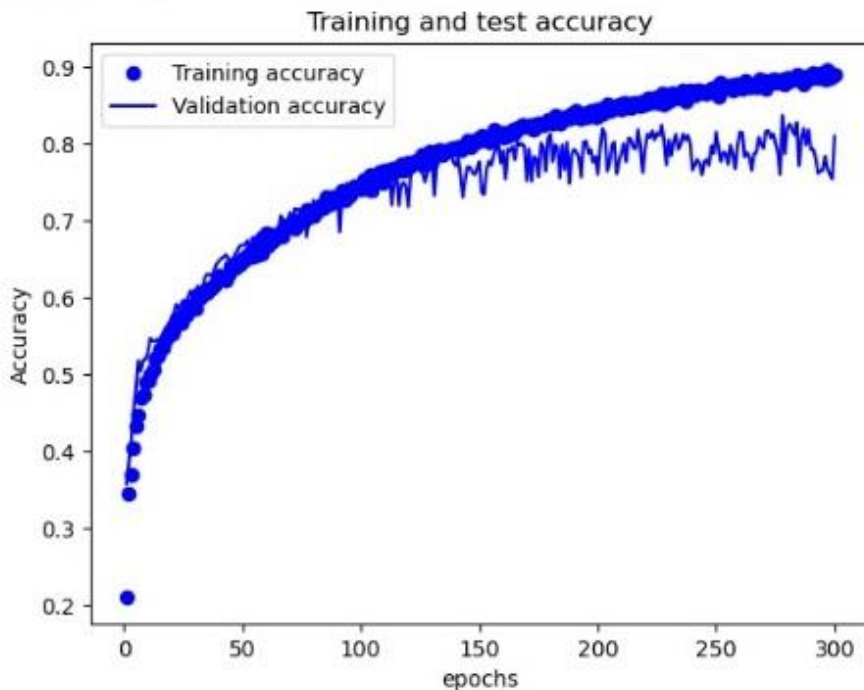


Рис. 2. График функции точности обучения тренировочной и валидационной выборок

Для валидации описанной методики была разработана экспериментальная установка, имитирующая работу термодатчиков МКА.

Экспериментальная установка состояла из трех термодатчиков DS18B20, управляемых микроконтроллером ESP-WROOM-32. Схема установки представлена на рис. 3. Датчики



имитировали температуру СОТР в зоне «ДТ1». В данной зоне были расположены три термодатчика (ДТ1.1–ДТ1.3), обеспечивающие температурный контроль аккумуляторных батарей МКА.

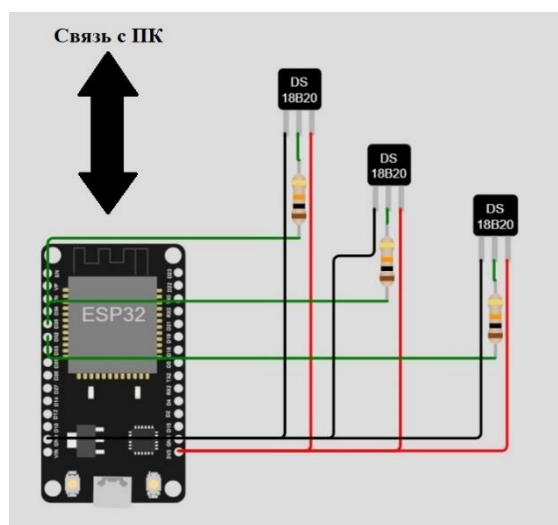


Рис. 3. Схема подключения термодатчиков DS18B20 к микроконтроллеру ESP-WROOM-32

Значения датчиков передавались на персональную электронную вычислительную машину. Имитация изменения температуры окружающей среды осуществлялась погружением термодатчиков в воду разной температуры (от 5 до 58°C). Результаты определения маркеров ТС представлены на рис. 4.

(а)	(б)	(в)
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 3
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 5	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 3
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 3
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 3	Маркер 5	Маркер 27
Маркер 27		

Рис. 4. Результаты определения маркеров ТС в зависимости от изменения температуры среды:  
 а – при комнатной температуре (19–24°C); б – при погружении в воду 5°;  
 в – при погружении в воду 40–58°C

Результаты определения маркеров ТС соответствуют истинным значениям с погрешностями: для комнатной температуры – 15%, для пониженной температуры окружающей сре-

ды – 0%, для повышенной температуры окружающей среды – 30%. Погрешности могут быть следствием нескольких факторов:

- недостаточного качества обучения многоклассового классификатора;
- ошибок обучающих объектов в обучающей выборке;
- погрешностей при усреднении значений термодатчиков.

Для визуального отображения изменчивости температуры в зоне «ДТ1» применим контрольную карту Шухарта [17]. Контрольная карта, демонстрирующая изменение усредненной температуры датчиков ДТ1.1–ДТ1.3 при моделировании в течение 25 мин при комнатной температуре среды, представлена на рис. 5.

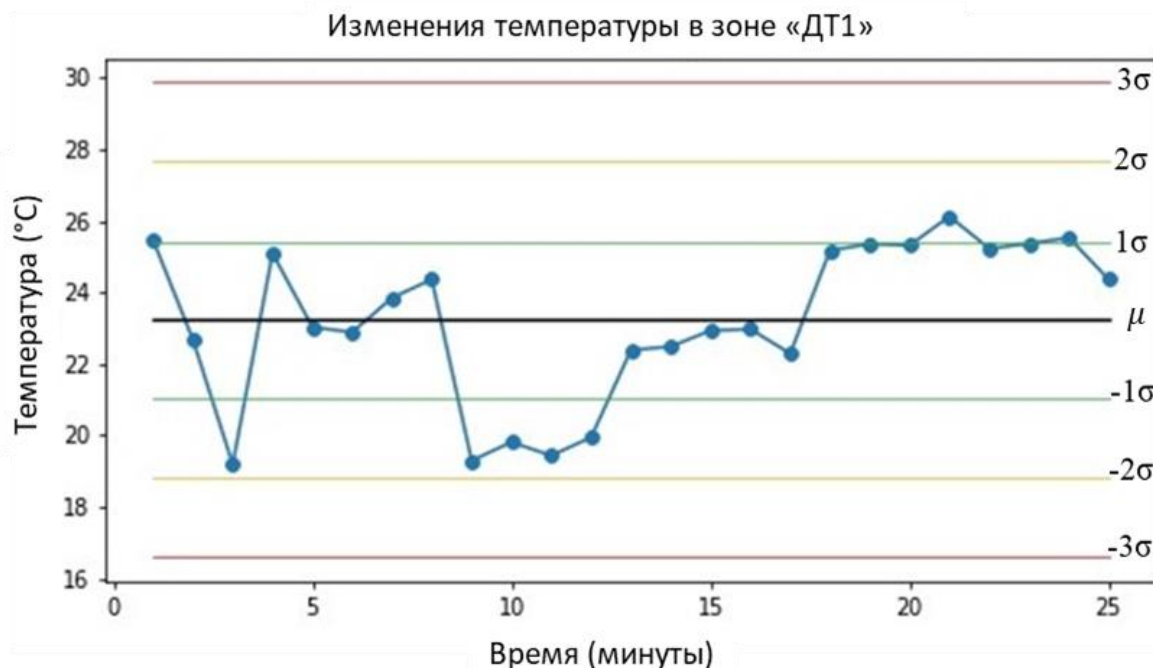


Рис. 5. График изменения значений температуры при моделировании работы датчиков ДТ1.1–ДТ1.3

Как видно из графика (рис. 5), на 3-й и 9-й минутах происходит резкий скачок значений до контрольной линии  $-2\sigma$ , а с 11-й по 21-ю минуту имеет место явно выраженный возрастающий тренд. Данные статистические аномалии могут являться признаками сбоев датчиков или их некорректной работы (ошибки калибровки, шумы в данных, искажающие истинное значение измеряемого параметра), нестабильности подачи электроэнергии (нарушение распределения электроэнергии), вызывающей кратковременные скачки напряжения или тока либо показателями неправильной работы контролируемой ФС. В случаях резких изменений значений параметров необходимо проведение дополнительного анализа по выявлению точной причины аномального поведения параметра с целью предотвращения возможных НШС.

Автоматизация выполнения этапа 5 напрямую зависит от количества исходных данных, содержащих эмпирическую информацию о поведении значений ТМП в различных ТС. В случае большого количества однотипных МКА, доступа к ТМИ, для проведения дальнейших исследований вопрос с количеством информации будет решен. Анализ ТМИ позволит установить связь между изменчивостью значений ДП и развитием несоответствий ФС МКА. Данная информация позволит обучить многоклассовый классификатор определению не только текущего ТС, но и начала развития будущих неисправностей. Это, в свою очередь, позволит внести в алгоритм работы МКА действия по предотвращению развития НШС на ранних стадиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная верификация разработанной методики показала перспективность ее дальнейшего развития для решения вопросов повышения автономности, увеличения жизненного цикла МКА, благодаря предотвращению НШС до их возникновения, повышению оперативности выполнения целевых задач МКА, уменьшению количества сеансов управления МКА, что позволит разгрузить НКУ и снизить материальные затраты на восполнение ОГ МКА.

Стоит отметить, что данная методика является универсальной при использовании на различных МКА, но требует точного формирования исходных данных для каждой ФС. Кроме заложенных требований к работе ФС в технической документации на МКА, необходимо также использовать уже имеющийся опыт эксплуатации различных МКА для формирования полных и точных исходных данных.

## Список используемых источников

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : [дата введения 1991-01-01]. – М. : Стандартиформ, 2009. – 10 с.
2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : [дата введения 2017-03-01]. – М. : Стандартиформ, 2017. – 30 с.
3. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты – новое направление космической деятельности. – М. : Науч. геоинформац. центр РАН (НГИЦ РАН), 2018. – 8 с.
4. Перспективы развития орбитальных группировок космических аппаратов с возможностью их обслуживания / Д. А. Бондаренко [и др.] // Труды ВНИИЭМ. – 2022. – С. 9–18.
5. Роскосмос : официальный сайт. – М., 2020. – URL: <https://www.roscosmos.ru/> 29535/ (дата обращения: 07.10.2023).
6. Балухто А. Н., Романов А. А. Искусственный интеллект в космической технике: состояние, перспективы развития // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2019. – Т. 6, вып. 1. – С. 65–75
7. Воронцов В. А., Федоров Е. А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. – 2015. – Вып. 82. – 25 с.
8. Абрамов Н. С., Талалаев А. А., Фраленко В. П. Интеллектуальный анализ телеметрической информации для диагностики оборудования космического аппарата // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2016. – С. 64–75.
9. Копкин Е. В., Кравцов А. Н., Мышко В. В. Анализ технического состояния космических средств: учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 189 с.
10. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. Deep Learning – MIT Press, 2016. – URL: <https://www.deeplearningbook.org/> (дата обращения: 04.04.2024).
11. Обучение нейросетевых каскадных классификаторов / Л. М. Тепляков [и др.] // Информационные процессы. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 439–450.
12. Дмитриев А. К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем. – МО РФ, 1999. – 171 с.
13. Солонин С. И. Метод контрольных карт : учеб. электрон. текст. Пособие. – Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).
14. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. – М. : Альпина Паблицер, 2016. – 410 с.

15. Опытно-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
16. *Гафаров Ф. М., Галимянов А. Ф.* Искусственные нейронные сети и их приложения : учеб. пособие. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
17. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Ч. 2. Контрольные карты Шухарта : национальный стандарт Российской Федерации : [дата введения 2016-12-01]. – М. : Стандартиформ, 2016. – 45 с.

Ю. И. Молодова,  
*кандидат технических наук;*  
И. В. Наумчик,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
М. В. Помошник;  
И. К. Прилуцкий,  
*доктор технических наук, профессор*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В СТУПЕНЯХ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА СО ВСТРОЕННЫМИ В ПОЛОСТЬ НАГНЕТАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ**

Представлены результаты исследования рабочих процессов, учитывающие нестационарный теплообмен в полости нагнетания ступени поршневого компрессора. Расчетно-теоретический анализ работы ступени поршневого компрессора проведен с использованием программы ANSYS. Основное внимание в работе уделено прогнозу технико-экономических показателей существующих многоступенчатых компрессоров со встроенными в полость нагнетания ступени поршневого компрессора дополнительными теплообменниками.

Научное решение поставленной задачи базируется на применении авторской программы «КОМДЕТ-ВКА», в основе которой лежит математическое описание свойств реальных газов и протекающих физических процессов на базе фундаментальных уравнений термодинамики тела переменной массы, теплообмена и массопереноса, механики и газовой динамики в сочетании с комплексом эмпирических коэффициентов и зависимостей, полученных при испытании конструктивно разнообразных имитирующих устройств, лабораторных и натуральных образцов поршневых машин.

Ключевые слова: поршневой компрессор, система газоснабжения, текущие рабочие процессы, интегральные параметры, конвективный теплообмен, стандартная точка нагнетания, дополнительный теплообменник.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время при разработке новых конструкций поршневых компрессоров высокого давления стремятся до минимума сократить число ступеней сжатия, сохраняя при этом температуры газа в стандартных точках нагнетания (СТН) на допустимом уровне  $T_{СТН} \leq 453$  К. Реализация подобного подхода приводит к росту отношения давлений по ступеням до  $\Pi_{ст} = p_{нр} / p_{вс} \leq 30$ , что требует существенной интенсификации процессов теплообмена в ступенях.

Одним из путей решения подобной задачи является совершенствование штатных конструкций ступеней, предусматривающее установку в полостях нагнетания ступеней дополнительных теплообменных устройств. Оценивание уровня технико-экономических характеристик модернизируемых ступеней компрессоров со встроенными в полости нагнетания дополнительными теплообменниками и является основной задачей настоящей работы.

Снижение температур сжимаемого газа достигается за счет применения в конструкции ступеней встроенных в их полости нагнетания охлаждаемых водой дополнительных теплообменных устройств, защищенных патентом РФ [1–3]. Авторы приводят примеры конструкций таких ступеней и результаты численного анализа текущих рабочих процессов и интегральных параметров в ступенях поршневых компрессоров с повышенным отношением давлений  $\Pi_{ст}$ , развитой внутренней теплообменной поверхностью цилиндров и примыкающих полостей нагнетания.

## ОЦЕНИВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНИ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОСТИ НАГНЕТАНИЯ

Одним из направлений улучшения технико-экономических характеристик вновь создаваемых или модернизируемых поршневых компрессоров с кривошипно-шатунным механизмом движения (КШМД) и создаваемых поршневых компрессоров с линейным приводом (ЛПр) является применение конструкций ступеней со встроенными в цилиндр и (или) прилегающие полости нагнетания дополнительными теплообменниками (ДТО) [5, 6]. Подобное исполнение ступеней способствует интенсификации отвода теплоты от сжимаемого газа и достижению при прочих равных условиях минимальных температур газа в стандартных точках нагнетания  $T_{\text{СТН}}$ .

Отличительным признаком поршневых компрессоров с ЛПр являются предельно малые величины относительных мертвых пространств  $0,01 \leq a \leq 0,03$ , повышенный ход поршня  $S_{\text{п}} \leq 500$  мм, низкие частоты рабочих циклов в диапазоне  $15 \leq n \leq 240$  ц/мин и небольшие средние скорости поршня  $c_{\text{п}} \leq 1,0$  м/с. Поэтому их сравнение с традиционными поршневыми компрессорами на базах с КШМД, укомплектованными ступенями с ДТО, рекомендуется проводить при следующих условиях:

– теоретическая производительность  $V_{\text{м}}$  является постоянной:

$$V_{\text{т}} = f(V_{\text{h}} n) = f(F_{\text{п}} S_{\text{п}} n) = \text{const}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{h}}$  – рабочий объем цилиндра, а  $V_{\text{h}} = F_{\text{п}} S_{\text{п}}$ ;

– площадь поршня при заданном диаметре цилиндра  $D_{\text{ц}}$  является величиной постоянной:

$$F_{\text{п}} = 0,785 D_{\text{ц}}^2 = f(D_{\text{ц}}^2); \quad (2)$$

– средняя скорость поршня  $c_{\text{п}}$  является величиной постоянной.

Из выражения (1) следует, что выполнение принятого условия  $V_{\text{м}} = \text{const}$  возможно лишь в том случае, если увеличение хода поршня ( $\uparrow S_{\text{п}}$ ) в рассматриваемых вариантах ступеней будет сопровождаться пропорциональным снижением частоты рабочих циклов ( $\downarrow n$ ) при сохранении  $c_{\text{п}} = \text{const}$ :

$$c_{\text{п}} = 2 \uparrow S_{\text{п}} \downarrow n = \text{const}. \quad (3)$$

В данном случае объемная производительность компрессора  $V_{\text{с.у.}}$ , приведенная к стандартным условиям ( $p = 0,1013$  МПа и  $T = 293$  К), связана с теоретической производительностью  $V_{\text{м}}$  уравнением

$$V_{\text{с.у.}} = \lambda V_{\text{м}} = f(\lambda), \quad (4)$$

где  $V_{\text{с.у.}}$  – величина, пропорциональная коэффициенту подачи ступени  $\lambda$ .

С целью получения научно обоснованных практических рекомендаций по соотношению величин внутренних теплообменных поверхностей полостей нагнетания и всасывания  $K_{\text{F}} = F_{\text{п.нг}} / F_{\text{п.вс}}$ , при которых температура газа в стандартной точке нагнетания не превысит уровня  $T_{\text{СТН}} \leq 453$  К, был проведен численный расчет на базе последней версии модернизированного программного комплекса КОМДЕТ-ВКА [4, 7]. Этот комплекс апробирован и введен до практического применения в ВКА имени А. Ф. Можайского. Кроме того, он внедрен в ряд отечественных предприятий и высших учебных заведений, связанных с изучением, разработкой, изготовлением и эксплуатацией поршневых компрессоров различного исполнения с кривошипно-шатунным механизмом движения и линейным приводом. В основе программы лежит математическое описание свойств реальных газов, газовых, газожидкостных и

паровоздушных смесей и протекающих физических процессов на базе фундаментальных уравнений термодинамики тела переменной массы, теплообмена и массопереноса, механики и газовой динамики в сочетании с комплексом эмпирических коэффициентов и зависимостей, полученных при испытании конструктивно разнообразных имитирующих устройств, лабораторных и натурных образцов.

Объектом исследования является ступень поршневого компрессора с поршнем одностороннего действия (рис. 1). В зависимости от порядкового номера и отношения давлений ступени могут комплектоваться разными типами клапанов. Предложенный вариант ступени предусматривает размещение в полости нагнетания дополнительного теплообменника, охлаждаемого проточной водой при условии сохранения габаритных размеров ступени. При указанных ограничениях и заданных геометрических параметрах варианта ступени ( $D_{ц} = 80$  мм и  $S_{п} = 65$  мм) в теплообменнике выполнен 21 водяной канал в виде трубок длиной  $L_{тр} = 40$  мм с внутренним диаметром  $\varnothing = 6$  мм.

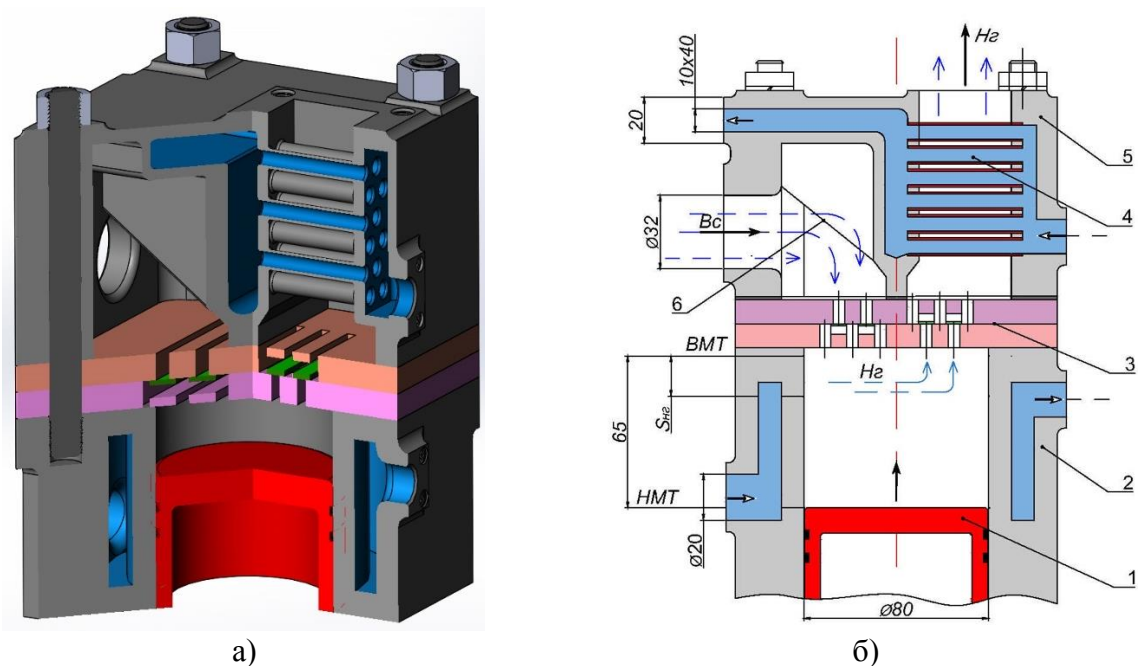


Рис.1. Модель ступени поршневого компрессора (ПК):

а – 3D-модель ступени ПК; б – 2D-модель ступени:

1 – поршень; 2 – цилиндр; 3 – клапан ленточный; 4 – ДТО; 5 – головка цилиндра;  
6 – ребра жесткости

Живое сечение  $F_{вх}^*$  на входе межтрубных каналов встроенного в полость нагнетания дополнительного теплообменника должно быть не менее сечения в щелях комплекта полностью открытых нагнетательных клапанов  $\sum F_{ц.кл.}$ .

Кроме того, при разработке варианта ступени с установленным ДТО в полости нагнетания необходимо выполнить условие

$$F_{вх}^* \geq \sum F_{ц.кл.} \quad (5)$$

Конфигурация трубчатых каналов теплообменника должна быть выбрана такой, чтобы это не приводило к значительным газодинамическим потерям и, как следствие, к потерям давления в сечении на входе в ДТО.

Для данной модели суммарная площадь сечения в щелях комплекта полностью открытых нагнетательных клапанов составила

$$\sum F_{\text{щ.кл.}} = z_{\text{пл}} z_{\text{кан}} \frac{2}{3} L_{\text{пл}} h_{\text{ц}} = 3,04 \text{ см}^2,$$

где  $z_{\text{пл}}$  – количество пластин в клапане;  
 $z_{\text{кан}}$  – количество каналов в клапане;  
 $L_{\text{пл}}$  – длина пластины;  
 $h_{\text{ц}}$  – высота перемещения центра пластин.

Живое сечение на входе межтрубных каналов встроенного в полость нагнетания дополнительного теплообменника составило  $F_{\text{вх}}^* = 3,20 \text{ см}^2$ .

Информация о рабочих процессах в ступенях со встроенными в полости нагнетания ДТО и оценка возможности повышения эффективности работы ступеней подобного типа были получены на основе расчетно-теоретического анализа работы ступени ПК, проведенного с использованием программы ANSYS. Результаты анализа представлены на рис. 2.

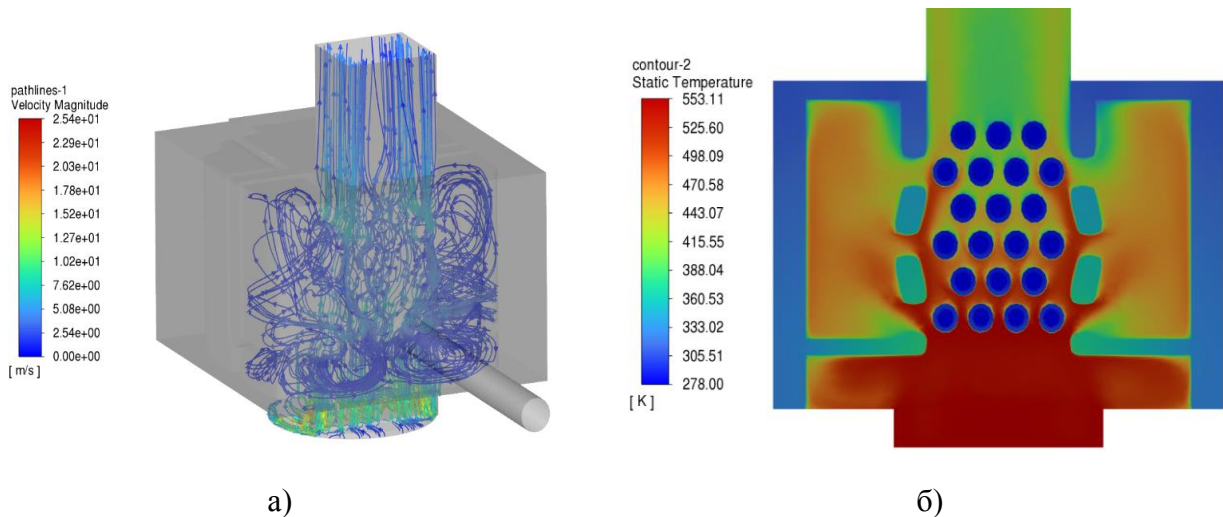


Рис. 2. Результаты численного расчета:  
 а – распределение температуры в плоскости теплообменника;  
 б – распределение линий тока газа

Расчет проводился на основе метода конечных объемов, общее количество элементов сетки составило  $1,3 \times 10^6$  ячеек. Были заданы следующие граничные условия: давление и температура в цилиндре:  $p_{\text{н}} = 1 \text{ МПа}$ ,  $T_{\text{н}} = 553 \text{ К}$ ; коэффициент теплоотдачи на поверхности крышки цилиндра  $\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ; температура охлаждающей жидкости  $T_{\text{в}} = 278 \text{ К}$ . На выходе для воды и газа задано условие открытого конца. Модель решалась на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса, которые замыкаются уравнением модели турбулентности SST  $k-\omega$ .

Анализ полученных результатов позволяет судить о появлении в полостях всасывания и нагнетания при полностью открытых органах газораспределения турбулентного режима течения газа (рис. 2,а). В процессе всасывания в каналах седла и ограничителя всасывающего клапана формируется струйный поток газа с периферийными вихреобразованиями. Скорость газа  $W_{\text{г}}$ , поступающего в цилиндр, на порядок превышает среднюю за время рабочего цикла скорость поршня  $c_{\text{п}}$ . В ступенях поршневых компрессоров с линейным приводом при повы-



шенных отношениях давлений ( $\uparrow \Pi_{ст} = \uparrow p_{нг} / p_{вс}$ ) и предельно малых мертвых пространствах ( $a \rightarrow \min$ ) наблюдаются уменьшение продолжительности процесса нагнетания и снижение средней скорости поршня на участке нагнетания  $c_{п.нг.} \ll c_{п.}$ , что свидетельствует, с одной стороны, о повышении надежности органов газораспределения, а с другой – негативно отражается на производительности ступени.

Информация, представленная на рис. 2,б, позволяет судить не только о динамике изменения давления и температуры газа в полости нагнетания во времени и пространстве, но и о реально достигнутом уровне значения температуры газа в стандартной точке нагнетания  $T_{стн.}$ .

В варианте ступени с  $D_{ц} = 80$  мм,  $S_{п} = 65$  мм и встроенным в полость нагнетания дополнительным теплообменником практический интерес представляет обоснование реального расхода охлаждающей воды через ДТО (рис. 3), выполненный по 6-рядной схеме и содержащий 21 водяной канал в виде трубок длиной  $L_{тр} = f(D_{ц}) = 40$  мм с внутренним диаметром  $\varnothing 6$  мм и толщиной стенок  $\delta \geq 1$  мм. При указанных параметрах суммарное внутреннее сечение трубок ДТО составит  $\sum f_{дто} = 5,9346 \text{ см}^2$ .

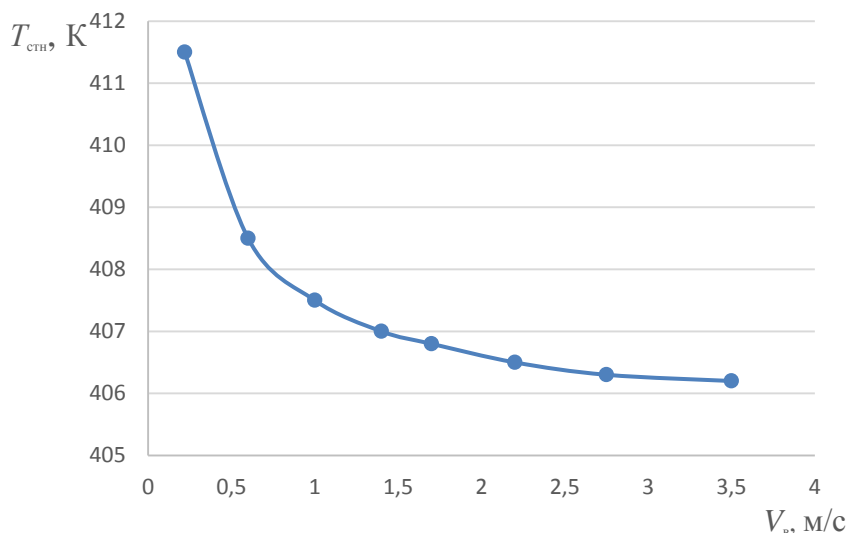


Рис. 3. Температура газа на выходе ступени  $T_{стн}$  при различных скоростях течения воды по каналам встроенного в полость нагнетания ДТО

Согласно результатам расчетно-теоретического анализа, приведенным на рис. 3, конечная температура газа на выходе ступени ( $T_{стн}$ ) слабо зависит от скорости течения охлаждающей воды  $V_{в}$  по каналам ДТО. Это позволяет при дальнейших исследованиях считать скорость течения воды в каналах ДТО величиной постоянной и равной 1,0 м/с. Учитывая сформулированное заключение, определим расход воды  $W_{в}$  через ДТО:

$$W_{в} = V_{в} \cdot \sum f_{дто} = 2,14 \text{ м}^3 \cdot \text{час.}$$

График зависимости температуры газа на выходе из ступени от скорости воды в теплообменнике показывает (рис. 3), что увеличение скорости воды выше 1–1,5 м/с приводит к незначительным изменениям температуры газа на выходе из ДТО.

В качестве критерия оценки эффективности принятого технического решения выбраны величины, выводимые на печать программой «КОМДЕТ – ВКА»: удельная индикаторная работа, характеризующая уровень совершенства текущих термодинамических процессов

$L_{уд.инд.}$  (кДж/кг); удельная мощность  $N_{уд}$  [кВт/( $с \cdot м^3/мин$ )], подводимая на вал компрессора. Их величина определяется на базе уравнения

$$N_{уд} = (\sum N_{инд.к} / \eta_{мех.к}) / V_{с.у.}, \quad (6)$$

где  $\sum N_{инд.к}$  – суммарная мощность на валу ПК с КШМД или штоке линейного привода, кВт;  
 $\eta_{мех.к}$  – механический КПД компрессора.

Значения удельной индикаторной работы и температуры в стандартной точке нагнетания в зависимости от количества трубок с водяным охлаждением в полости нагнетания представлены на рис. 4.

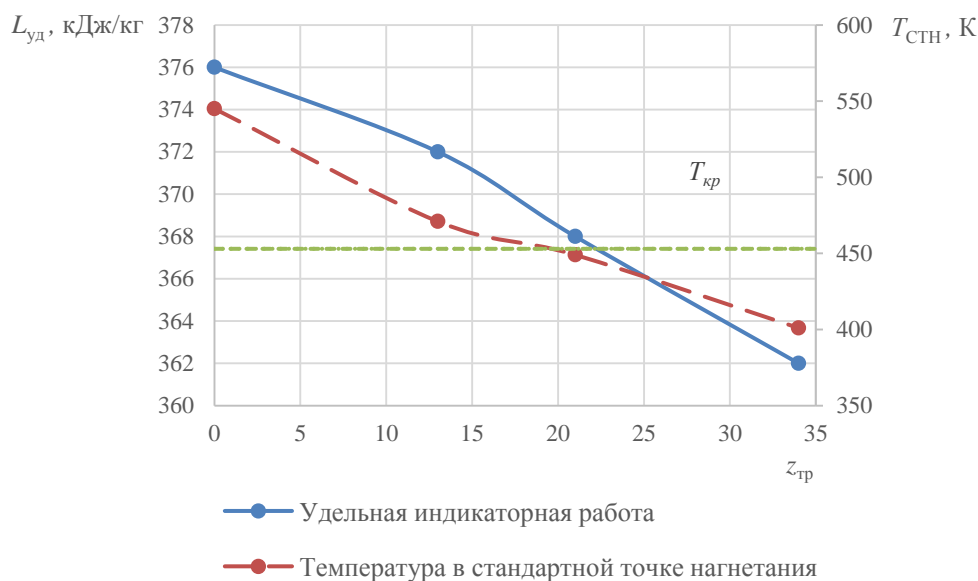


Рис. 4. Удельная индикаторная работа и температура в стандартной точке нагнетания при различных количествах трубок ДТО

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что применение ДТО в ступени поршневого компрессора способствует увеличению теплообменной поверхности в полости нагнетания и реализует более интенсивное отведение теплоты от сжимаемого газа. Необходимое условие, при котором температура газа в стандартной точке нагнетания не превышает уровня  $T_{сгн} \leq 453$  К, обеспечивается ДТО с  $z_{тр} \geq 21$ . Однако увеличение числа каналов ведет к росту газодинамических потерь в нагнетательном тракте рассматриваемой ступени. С учетом вышесказанного необходимо иметь в виду условие (5) при подборе числа каналов ДТО в полости нагнетания ступени поршневого компрессора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование процессов, протекающих в полости нагнетания поршневого компрессора, с использованием методов конечных объемов в полной мере позволяет получить распределение основных характеристик рабочего тела и газодинамических параметров в течение рабочего цикла. Использование симуляции процесса в ступени поршневого компрессора позволяет наглядно исследовать процессы нестационарного теплообмена, проанализировать возможные конструктивные недостатки теплообменных устройств. Результаты исследований

показали, что применение дополнительных теплообменных устройств в полости нагнетания поршневых компрессоров способствует понижению температуры сжимаемого газа путем отвода теплоты на 17,6% за счет дополнительного увеличения удельной теплообменной поверхности при сохранении габаритных размеров. Это позволяет повысить технико-экономические показатели поршневых компрессоров, а именно удельную индикаторную работу на 4% при сохранении подводимой на вал компрессора удельной мощности. Наличие дополнительных теплообменных устройств в полости нагнетания позволит получать требуемые параметры сжатых газов с меньшим числом ступеней сжатия, снижая массогабаритные размеры всего поршневого компрессора.

### Список используемых источников

1. Пат. 2734088 Рос. Федерация. Ступень поршневого компрессора с жидкостным охлаждением / Казимиров А. В., Молостов А. В., Прилуцкий И. К., Ведерников М. В., Пеньков М. М., Молодова Ю. И., Горбушин А. Л. – № 2019140737; заявл. 09.12.2019; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29. – 9 с.
2. Пат. 2812878 Рос. Федерация. Ступень поршневого компрессора / Наумчик И. В., Прилуцкий И. К., Молодова Ю. И., Ведерников М. В., Молостов А. В. – № 2022120907; заявл. 05.07.2022; опубл. 05.02.2024, Бюл. № 4. – 10 с.
3. Пат. 2817323 Рос. Федерация. Ступень поршневого компрессора / Помошник М. В., Прилуцкий И. К., Казимиров А. В., Ведерников М. В., Молодова Ю. И.; заявитель и патентообладатель ВКА имени А. Ф. Можайского. – № 2023114677; заявл. 02.06.2023; опубл. 15.04.2024, Бюл. № 11. – 10 с.
4. Пеньков М. М., Прилуцкий И. К., Прилуцкий А. И. Основы расчета и оптимального проектирования поршневых компрессоров и детандеров на унифицированных базах. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. – 304 с.
5. Анализ рабочих процессов и оценка уровня механического КПД поршневых компрессоров с линейным приводом для систем газоснабжения и жизнеобеспечения объектов вооружения / И. В. Ворошилов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 259–279.
6. Влияние величины внутренней теплообменной поверхности цилиндров поршневых компрессоров с кривошипно-шатунным и линейным приводом на интенсивность теплообменных процессов в ступенях с повышенным отношением давления / И. К. Прилуцкий [и др.] // Вестник Международной академии холода. – 2022. – Вып. 1. – С. 11–25.
7. Алгоритм ввода в программу КОМДЕТ-М рабочих веществ произвольного состава / И. К. Прилуцкий [и др.] . – СПб. : Ун-т ИТМО, 2018. – 79 с.

А. М. Попов;  
В. В. Ткаченко,  
*кандидат технических наук;*  
В. В. Шмелев,  
*доктор технических наук, доцент*

## **МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ И ОТЛАДКИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

В статье рассматриваются различные аспекты обработки измерительной информации, полученной от ракет-носителей, включая алгоритмы анализа телеметрической информации, модели и способы организации распределенных систем сбора и обработки измерительной информации, применение интеллектуальных методов анализа и оценку характеристик телеметрируемых параметров при проведении испытаний и пусков. Приведены примеры ошибок, оказывающих влияние на представление измерительной информации о техническом состоянии бортовых систем ракет-носителей, что не позволяет адекватно оценить штатность функционирования изделий как при испытаниях, так и при штатной эксплуатации изделий.

Обоснована необходимость разработки методики, обеспечивающей повышение степени доверия к функционированию алгоритмов обработки за счет внедрения в структуру процесса обработки верификации исходных данных и логики построения специального программно-математического обеспечения (СПМО).

Приведен пример реализации методики в условиях нештатного поведения телеметрируемых параметров (ТМП) при возникновении различного рода ошибок в алгоритмах обработки телеметрической информации (ТМИ). Показано, каким образом осуществляется интерпретация ошибок в поведении свойств сети Петри. Описан пример поиска и коррекция возникающих ошибок с использованием формальных математических инструментов сетей Петри.

Ключевые слова: алгоритмы обработки информации, ошибки в алгоритмах, сети Петри, анализ свойств, верификация модели, отладка модели, моделирование вычислительных процессов.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Опыт эксплуатации комплексов обработки ТМИ и анализа штатности функционирования бортовых систем космических средств показал, что при подготовке СПМО проверка процесса обработки измерительной информации осуществляется визуально по предполагаемому положению значений параметров на средствах отображения на основании эмпирической выборки. Уязвимой стороной такого подхода являются:

- низкая степень возможности изменений алгоритмов обработки для перспективных изделий;
- длительные временные интервалы для внесения поправок в действующий алгоритм обработки телеизмерений;
- высокая степень доверия оценке эксперта по результату процесса.

Причины описанных недостатков могут заключаться в несовершенстве математического аппарата моделирования обработки ТМИ. Для обоснования возможности решения задачи проверки исходных данных и при необходимости коррекции алгоритмов обработки ТМИ, необходимо синтезировать формальную модель, описывающую процессы верификации исходных данных и отладки алгоритмов обработки ТМИ. Процесс обработки ТМИ состоит из разнородных компонент, и для того чтобы выбрать математическую основу для его моделирования, необходимо определить, какие задачи должны решаться с их помощью [1].

Протекции от указанных уязвимостей можно добиться за счет вычислительных сетей Петри, обладающих набором математических правил и свойств, позволяющих математически анализировать процесс обработки ТМИ [1]. Интерпретация вычислительных сетей Петри для алгоритмов обработки ТМИ позволит производить отладку процесса в автоматизированном режиме.

## АНАЛИЗ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОШИБОК В АЛГОРИТМАХ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

При обработке телеметрической информации (ТМИ) допускаются ошибки при задании исходных данных:

- масштабных коэффициентов;
- значений коэффициентов для перевода в абсолютные величины;
- адреса каналов и портов;
- последовательности вычислительных операций и т. д.

В практике обработки ТМИ периодически возникают различные ошибки представления результатов обработки, что значительно затрудняет процесс последующего оценивания штатности функционирования бортовых систем и изделия в целом. Например, на этапе подготовки исходных данных перед пуском РКН в массив исходных данных для полной обработки телеметрической информации внесены неверные значения масштабных коэффициентов. Характеристика ТМП в таком случае имела аномальное поведение, отличающееся от поведения параметра при проведении предыдущих испытаний аналогичного изделия. Причину аномалии удалось установить только на заводе-изготовителе несколько месяцев спустя – значение масштабного коэффициента для данного типа параметров «250» не соответствовало заданию на обработку – «400».

При реализации алгоритмов обработки ТМИ могут не учитываться приоритеты предикатов, приводящие к заикливаниям в алгоритмах. Имели место случаи, когда при подготовке баз данных (БД) для обработки ТМИ, т. е. формуляров отображения в реальном масштабе времени (РМВ), их содержание не соответствовало требуемому. Такие ошибки приводят к подмене БД обработки ТМИ на неактуальную базу данных при загрузке оператором. Причина ошибки в неосвобождении буфера от предыдущих значений БД, что приводит к заикливанию при закладке БД на обработку. В случаях неправильного задания логических и функциональных выражений для вычисления значений параметров или нарушения очередности операций обработки ТМИ, отдельные ТМП обрабатываются несоответствующими операторами обработки. Такие ошибки приводят к нарушению семантического содержания значительной части данных о техническом состоянии отдельных агрегатов изделия.

Описанные примеры можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

### Примеры ошибок в алгоритмах обработки ТМИ

№ п/п	Причины возникновения ошибок	Проявление ошибки	Результаты допуска ошибок в алгоритмах обработки ТМИ
1	Ошибка оператора	Получена ТМИ с некорректными значениями ТМП	Ошибка в значении масштабного коэффициента
2	Ошибка в алгоритме обработки ТМИ (нереализация приоритетных предикатов)	Невозможность внести требуемую БД на обработку	Заикленность закладки БД
3	Ошибка в алгоритме (нарушение последовательности вычислительных операций при обработке ТМП)	Поведение полученных ТМП не соответствовало поведению подобных ТМП при предыдущих пусках	Отдельные ТМП обрабатывались несоответствующими операторами

Наличие ошибок в алгоритмах обработки ТМИ говорит о недостаточно качественной процедуре их подготовки и порождает задачу повышения степени доверия к их функционированию.

## МЕТОДИКА ВЕРИФИКАЦИИ И ОТЛАДКИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ТМИ

Для осуществления процедуры поиска и коррекции ошибок в алгоритмах обработки ТМИ предлагается методика, состоящая из последовательности шагов.

*Шаг 1.* Формирование структурно-функциональной модели процесса обработки ТМИ.

*Шаг 2.* Построение матриц входных  $D^-$  и выходных  $D^+$  инцидентов, основанных на количественных отношениях элементов множеств модели (позиций и переходов, где под позициями понимается состояние процесса обработки ТМИ, а под переходами – операции обработки).

*Шаг 3.* Расчет матрицы инцидентности  $D$  структурно-функциональной модели процесса обработки ТМИ, закладка в модель начальной разметки сети Петри  $\mu^T$ , эквивалентной начальному состоянию процесса обработки ТМИ, проведение анализа свойства достижимости модели.

*Шаг 4.* При некорректном решении уравнения провести коррекцию начальной маркировки сети  $\mu^T$ , коррекцию отношений между элементами сети, необходимую для поиска места ошибки в алгоритме обработки ТМИ [4, 7].

*Шаг 5.* Проведение анализа свойства устойчивости (незацикленности) для поиска зацикливаний в алгоритмах обработки ТМИ [2]. Если решение уравнения устойчивости «нулевое», то алгоритм обработки ТМИ имеет зацикливание.

*Шаг 6.* При «нулевом» решении уравнения устойчивости провести коррекцию отношений между элементами сети в матрицах входных  $D^-$  и выходных  $D^+$  инцидентов (упразднить циклические отношения). В процессе обработки ТМИ это отражается во внесении приоритетных предикатов в операции обработки ТМИ или в пересмотре последовательности таких операций.

*Шаг 7.* Осуществить проверку упразднения отношений путем решения уравнения достижимости.

*Шаг 8.* Вывод об успешной отладке модели.



Рис. 1. Структура методики верификации и отладки алгоритмов обработки ТМИ

## ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТМИ

В соответствии с шагом 1 предлагаемой методики рассмотрим операции обработки ТМИ в структурно-функциональном представлении в виде вычислительной сети Петри.

Структурно-функциональная модель обработки телеметрической информации представлена на рис. 2.

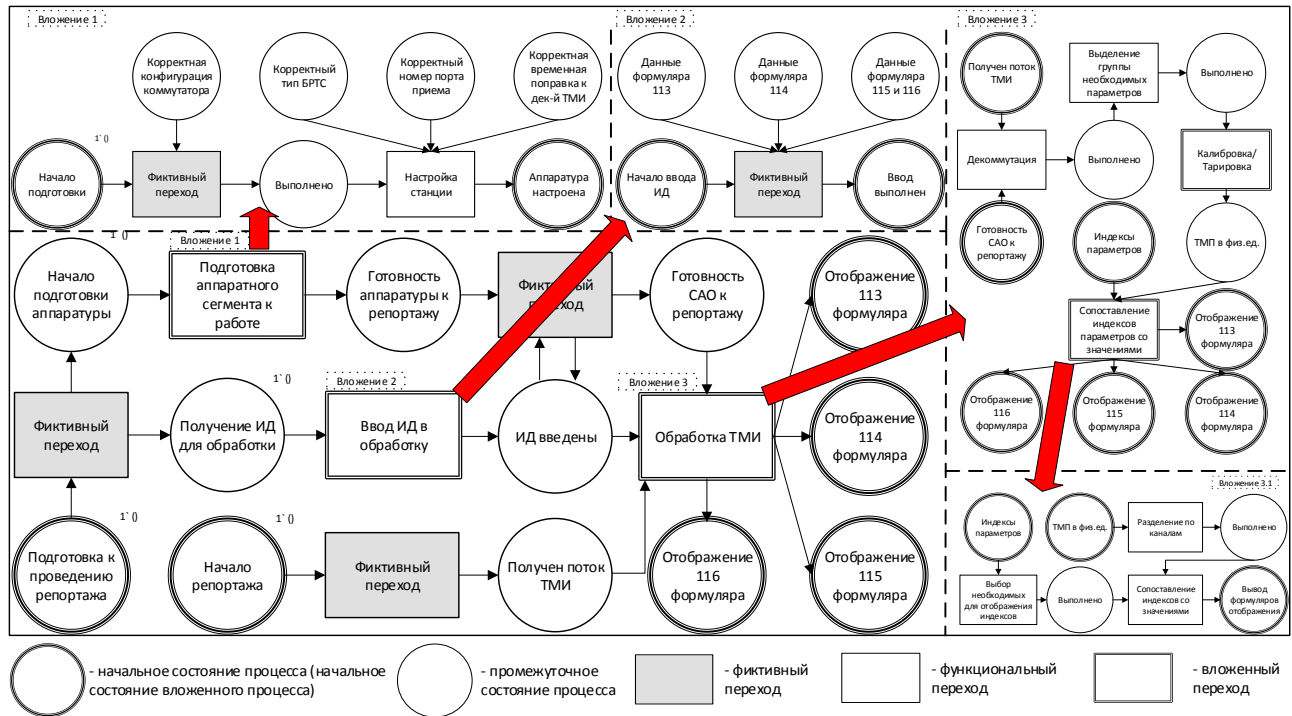


Рис. 2. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ на основе вычислительной сети Петри

Элемент модели «начальное состояние процесса (начальное состояние вложенного процесса)» моделирует наличие необходимого начального состояния (необходимых начальных условий) для запуска операций обработки ТМИ. Элемент модели «промежуточное состояние» моделирует наличие необходимых условий для выполнения промежуточных операций обработки ТМИ. Элемент «фиктивный переход» не выполняет функциональных операций: он необходим для адекватного воспроизведения процесса обработки ТМИ. Элемент «вложенный переход» сам по себе является отдельной упрощенной вычислительной сетью Петри, внутри которой могут находиться все остальные элементы, а при необходимости – и более высокой вложенности. Элемент «функциональный переход» может содержать в себе различные функции обработки ТМИ, операторы сравнения и т. д. По существу, представляет собой конкретную операцию обработки ТМИ.

В сформированную модель процесса обработки ТМИ заложим приведенные в табл. 1 ошибки и покажем, как, используя правила сетей Петри, можно производить отладку модели процесса.

## ОТЛАДКА ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ТМИ

Рассмотрим первый пример из табл. 1 – неправильное внесение в массив исходных данных для обработки значения масштабного коэффициента. Поскольку модель, представленная на рис. 2, достаточно громоздкая, произведем декомпозицию этой модели до части внесения

исходных данных в обработку. Тогда искомая часть может быть представлена в виде сети Петри, как показано на рис. 3 (шаг 1 указанной методики).

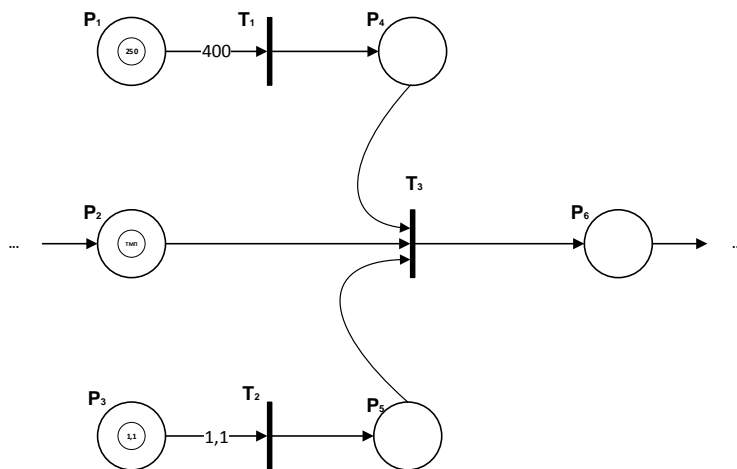


Рис. 3. Декомпозированная сеть Петри ввода масштабного коэффициента

Согласно шагам 2 и 3 рассматриваемой методики, необходимо составить матрицу инцидентности  $D$  полученной сети и решить уравнение достижимости [2]. Известен вектор начальной разметки  $\mu^T$ , который характеризуется вводом в массив ИД значений масштабного коэффициента (позиция  $P_1$  на рис. 3), наличием значения ТМП в телеметрических единицах (позиция  $P_2$  на рис. 3) и значения перевода ТМП в абсолютные величины (позиция  $P_3$  на рис. 3). Известен вектор конечной разметки  $\mu^T$ , получены значения ТМП в физических единицах (позиция  $P_6$  на рис. 3). Тогда получим:

$$(0, 0, 0, 0, 0, 1) = (250, 1, 1, 0, 0, 0) + \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -400 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 400x_1 = 250 \\ x_3 = 1 \\ x_2 = 1 \\ x_1 - x_3 = 0 \\ x_2 - x_3 = 0 \\ x_3 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Система линейных уравнений (2) не имеет корректного решения [3, 6], необходимо осуществить переход к этапу коррекции начальной маркировки  $\mu^T$  в соответствии с работами [4, 7].

Переходим к шагу 4 рассматриваемой методики.



Сведя (2) к каноническому виду, получим

$$J = \begin{pmatrix} 400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 250 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Используя предлагаемый в работах [4, 7] подход, получим скорректированную систему линейных уравнений

$$\begin{cases} 400x_1 = 400 \\ x_3 = 1 \\ x_2 = 1 \\ x_1 - x_3 = 0 \\ x_2 - x_3 = 0 \\ x_3 = 1 \end{cases}. \quad (4)$$

Для алгоритма обработки ТМИ корректировка системы линейных уравнений означает, что неверное значение коэффициента, введенное в ИД для обработки, исправилось на корректное (исправлено значение масштабного коэффициента с 250 на 400). Переход к дальнейшим шагам методики нецелесообразен, потому что ошибку удалось обнаружить и исправить на шаге 4.

Таким образом, первую ошибку, приведенную в табл. 1, можно обнаружить и исправить, используя предлагаемую методику.

Поведение ТМП до и после исправления ошибки представлено на рис. 4.

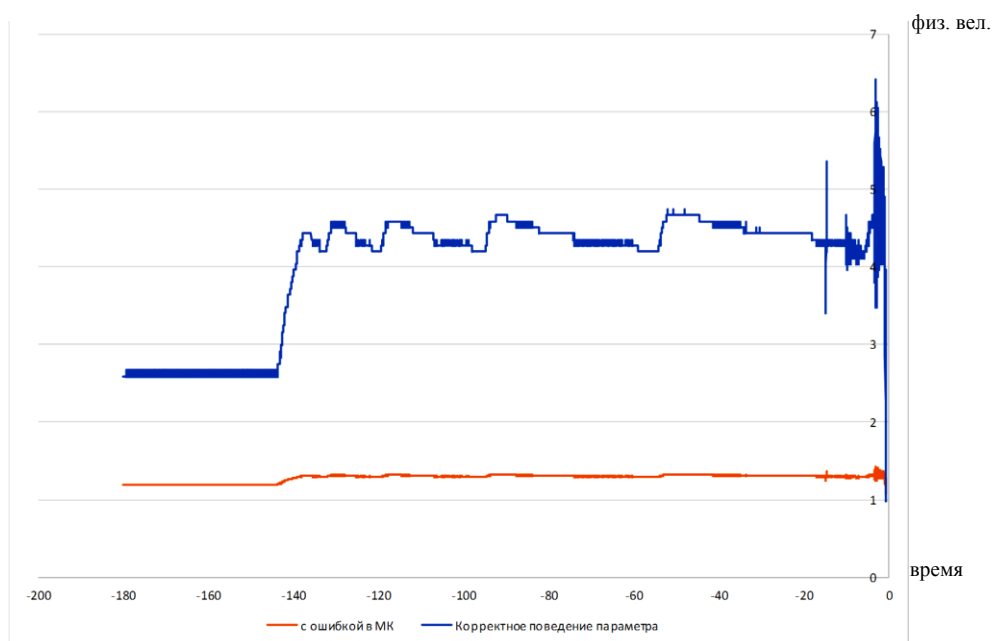


Рис. 4. Поведение ТМП с ошибкой и после коррекции

Для шагов 5–7 предлагаемой методики рассмотрим второй пример ошибки из табл. 1 – возникновение заикливания в алгоритме обработки телеметрической информации. Декомпозированная сеть Петри такого процесса представлена на рис. 5.

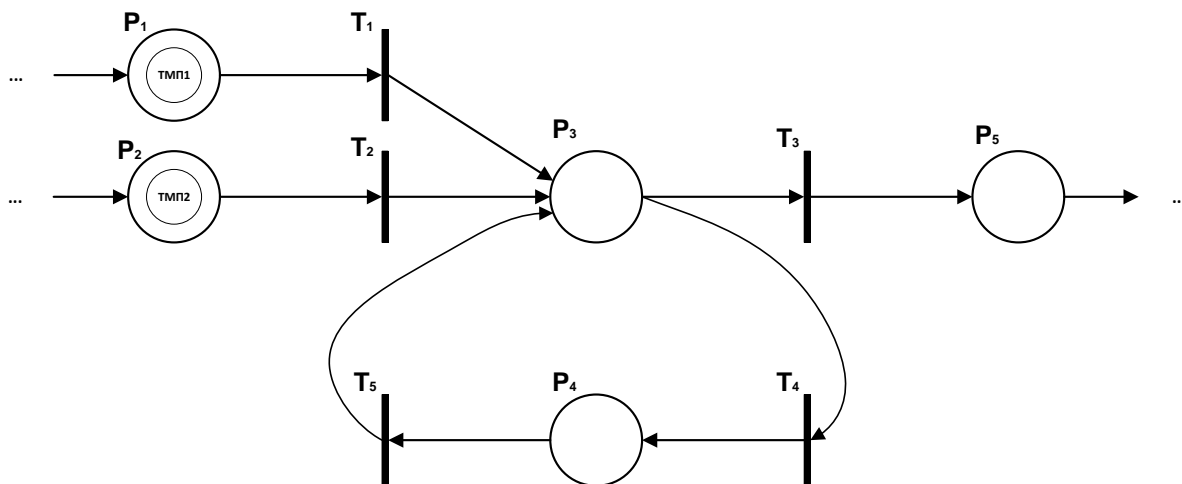


Рис. 5. Устойчивая сеть Петри процесса обработки ТМИ

Физически такое заикливание также может быть выражено в неосвобождении буфера от предыдущего значения на этапе сравнения значений телеизмерений при повышении достоверности, в нереализации в алгоритме обработки приоритетных предикатов, в неочищении буфера от разностных характеристик и т. п.

Для поиска заикливаний в сети, представленной на рис. 5, необходимо составить матрицу инцидентности  $D$  и решить уравнение устойчивости (5) [2]. Поскольку в данном случае речь идет об алгоритме обработки ТМИ, необходимо чтобы все операции над телеизмерениями выполнялись в соответствии со своей очередностью, поэтому вектор срабатываний переходов  $A$  будет единичным. Тогда

$$D \cdot A = 0 \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Сеть будет устойчива, если произведение матрицы инцидентности  $D$  на вектор срабатываний переходов  $A$  даст нулевое решение [3, 6]. Переходим к шагу 5.

$$A \cdot D = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для отладки заикливаний в алгоритме обработки ТМИ необходимо проанализировать матрицу входных инцидентий  $D^-$  на множественные отношения из позиций в переходы:

$$\exists I : P \rightarrow T^n \in D^-, \tag{8}$$

$$\forall I : P \rightarrow T^n \in D^-, n \in N, d_{pt}^- = 0, \tag{9}$$

$$\forall p \in [1, n], \forall t \in [1, m] : P \rightarrow T \in D^-.$$

Перейдем к шагу 6. Изменяем сеть, исправив отношения между позициями и переходами в ручном режиме, или последовательно упраздняем (в матрице инцидентности  $D^-$  принимать элемент отношения за «0») отношения между позициями и переходами до решения уравнения достижимости в автоматизированном режиме [2].

Анализ матрицы входных инцидентий  $D^-$

		$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	
$D^- =$	$t_1$	1	0	0	0	0	(10)
	$t_2$	0	1	0	0	0	
	$t_3$	0	0	1	0	0	
	$t_4$	0	0	1	0	0	
	$t_5$	0	0	0	1	0	

показывает, что позиция  $P_3$  входит в несколько переходов, образуя цикл, и является началом закливания алгоритма.

Таким образом, по предлагаемой методике производят отладку закливаний в алгоритмах обработки ТМИ, а также исправляют ошибки, подобные второй ошибке из табл. 1. Поведение ТМП при наличии закливания в алгоритме обработки ТМИ представлено на рис. 6.

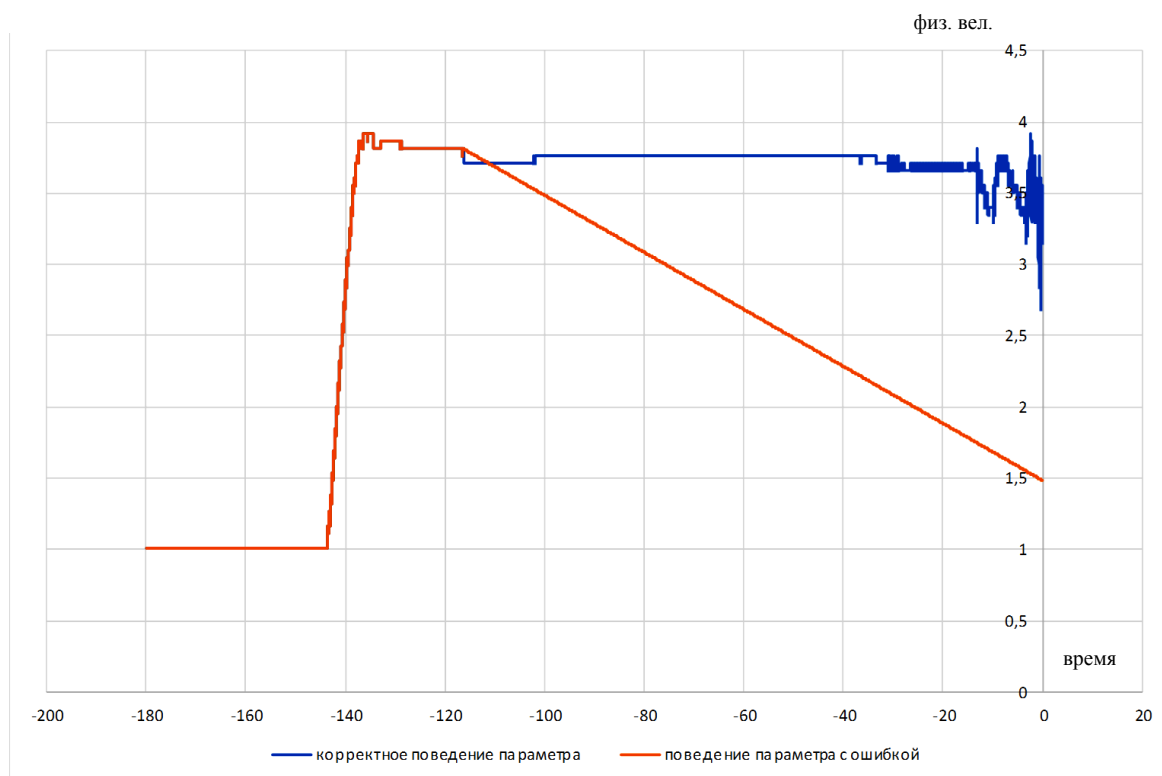


Рис. 6. Поведение ТМП при закливании и после коррекции

Рассмотрим третий пример из табл. 1 – ошибка в функциональном выражении обработки параметра (когда значение телеизмерения обрабатывается несоответствующей функцией). Декомпозированная сеть Петри такого процесса представлена на рис. 7.

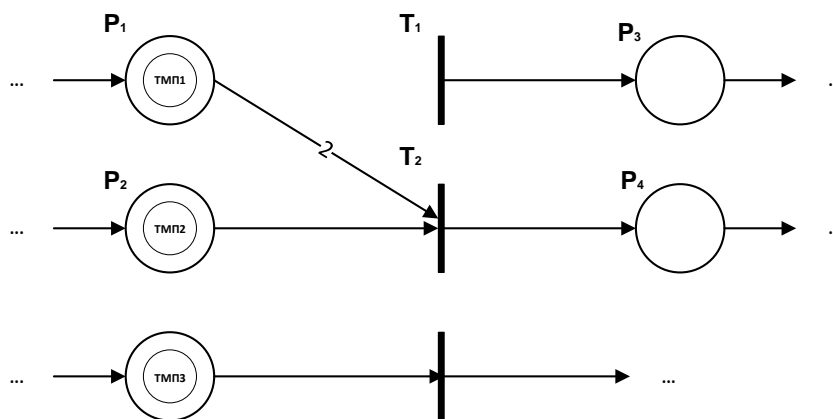


Рис. 7. Сеть Петри с ошибкой в функции обработки ТМИ

Рассчитываем соответствующую матрицу инцидентности  $D$ , для решения уравнения достижимости (шаги 2 и 3 предлагаемой методики). Известен вектор начальной разметки  $\mu^T$ , который характеризуется наличием ТМП (позиции  $P_1$  и  $P_2$  на рис. 7). Известен вектор конечной разметки  $\mu'^T$ , получены значения обработанных значений ТМП (позиции  $P_3$  и  $P_4$  на рис. 7). Известны соответствующие им операции обработки (переход  $T_1$  для позиции  $P_1$  и переход  $T_2$  для позиции  $P_2$  на рис. 7). Тогда получим:

$$\mu'^T = \mu^T + e^T[i] \cdot D, \quad (11)$$

$$(0, 0, 1, 1) = (1, 1, 0, 0) + (x_1, x_2) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_2 = \frac{1}{2} \\ x_2 = 1 \\ x_1 = 1 \\ x_2 = 1 \end{cases} \quad (13)$$

Система линейных уравнений (11) не имеет корректного решения. Корректным решением является  $x_i \in N$ .

Перейдем к шагу 4. В данном случае коррекция начальной маркировки [4, 7] не даст положительного решения при коррекции, поскольку она корректирует только вектор начальной маркировки  $\mu^T$  в уравнении достижимости. В представленном случае ошибка будет находиться в матрице инцидентности  $D$ , поэтому, в соответствии с работой [2], необходимо анализировать матрицы входных  $D^-$  и выходных инцидентий  $D^+$  на наличие векторов  $p_i = 0$  и  $t_p = 0$ .

Анализ матрицы входных инцидентий  $D^-$

$$D^- = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ t_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_2 & 2 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (14)$$

показывает, что переход  $t_1$  не активен. Для алгоритма обработки ТМИ это означает, что не выполняется определенная операция обработки, соответствующая конкретному телеметрируемому параметру, а телеизмерение обрабатывается по несоответствующему алгоритму.

Таким образом, используя приведенную методику, можно находить и исправлять ошибки в алгоритмах обработки ТМИ, подобные третьему примеру из табл. 1.

Поведение параметра с ошибкой в функциональном выражении при обработке представлено на рис. 8.

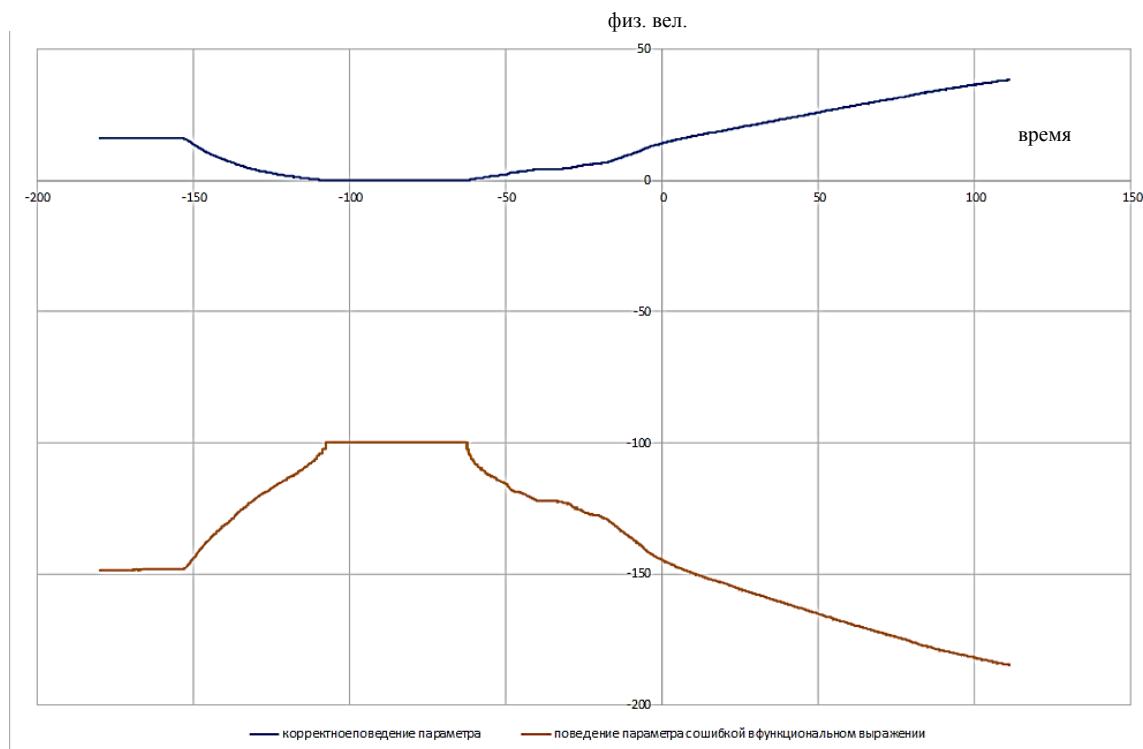


Рис. 8. Поведение ТМП с ошибкой в функциональном выражении и после коррекции

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методики автоматизированной верификации и отладки структурно-функциональной модели процесса обработки телеметрической информации позволяет задавать и проверять формальные требования на основе математического аппарата сетей Петри. Интерпретация этих требований для алгоритмов обработки ТМИЮ в свою очередь, позволяет формулировать методическое и синтезировать программное обеспечение для поиска и коррекции ошибок в них. В статье приведены примеры ошибок, которые могут быть допущены при обработке ТМИ, показаны поведение значений ТМП при таких ошибках, а также порядок их поиска и устранения.

## Список используемых источников

1. Шмелев В. В., Николаев А. Ю., Попов А. М. Поиск путей решения задачи моделирования алгоритмов обработки телеметрической информации для их дальнейшей верификации // Системы и приборы управления : тр. НПЦАП. – 2023. – № 2. – С. 12–20. – EDN XBKUZC.

2. *Попов А. М.* Алгоритм автоматизированной верификации структурно-функциональной модели обработки телеметрической информации на основе вычислительной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 11. – С. 251–257. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-257-258.
3. *Котов В. Е.* Сети Петри. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 160 с.
4. *Павлов Д. А., Ткаченко В. В., Попов А. М.* Модель коррекции начальной маркировки классической сети Петри на основе решения задачи дискретного программирования // Труды МАИ. – 2023. – № 131. – URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=1755928&mobile=Y> (дата обращения: 01.12.2023). – DOI: 10.34759/trd-2023-131-22. – EDN VASDUG.
5. *Шмелев В. В., Попов А. М.* Алгоритм первичной обработки телеметрической информации с автоматизированной верификацией исходных данных и коррекцией ошибок // Информация и Космос. – 2023. – № 3. – С. 53–58. – URL: [infokosmo.ru/ru/article/17167](http://infokosmo.ru/ru/article/17167) (дата обращения: 01.12.2023).
6. *Веретельникова Е. Л.* Теоретическая информатика. Теория сетей Петри и моделирование систем. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 82 с.
7. *Шмелев В. В., Павлов Д. А., Попов А. М.* Модель верификации исходных данных в процессе обработки телеметрической информации на основе решения задачи линейного целочисленного программирования // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 7. – С. 3–10. – DOI: 10.25791/aviakosmos.7.2023.1347. – EDN MBFZGU.

М. А. Голубев,  
кандидат военных наук, доцент;  
Л. В. Розанова

## МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ ВОЕННО-УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

В публикации рассматривается возможный подход к формированию внутренней системы оценки качества образования военно-учебного заведения Минобороны России. Ее модель разработана и апробирована в Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.

Ключевые слова: военно-учебное заведение, внутренняя система оценки качества образования, образовательная деятельность, образовательный процесс.

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие внутренней системы оценки качества образования (далее – ВСОКО) в образовательной организации в настоящее время является одним из показателей государственной аккредитации образовательной организации [1]. Единые требования к ее структуре и содержанию отсутствуют. В связи с этим образовательные организации выбирают собственные концепции и программы разработки, внедрения и реализации ВСОКО в образовательном процессе.

Анализ действующих ВСОКО показал, что образовательные организации в ряде случаев, руководствуясь стандартами систем менеджмента качества (далее – СМК) ГОСТ Р ИСО серии 9000, рассматривают ВСОКО как часть сертифицированных СМК. Наличие таких систем подтверждается сертификатами независимой оценки и свидетельствами об общественной аккредитации.

Опыт разработки СМК образования, основанных на требованиях ГОСТ Р ИСО серии 9000, реализован в результате исследований, проведенных в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ». Сотрудники университета в 2006 году в результате выполнения проекта «Апробация, доработка и внедрение в образовательных учреждениях высшего профессионального образования типовой модели системы качества образовательного учреждения» представили методические рекомендации по ее внедрению. В них особое место отводится гарантиям качества в образовании. Они рассматриваются как комплексная деятельность образовательных организаций применительно к качеству и включают планирование, управление, обеспечение, улучшение и оценку качества [2].

В военно-учебных заведениях (далее – вузах) Минобороны России СМК образования на базе требований ГОСТ Р ИСО серии 9000 не разрабатывались и не внедрялись по следующим основным причинам:

- наличие сертифицированной СМК образования не является обязательным требованием к деятельности вуза Минобороны России;
- разработка и внедрение СМК образования являются длительным процессом с привлечением специализированных организаций и значительных финансовых затрат;
- реализация СМК образования требует создания отдельного структурного подразделения, которое не включено в типовой штат вуза Минобороны России;
- для качественной работы сотрудников вуза Минобороны России необходима их подготовка в сертификационных центрах, что требует также существенных финансовых затрат;
- вузы Минобороны России при подготовке своих выпускников руководствуются требованиями заказчика и находятся под постоянным его контролем подготовки, что не требует дополнительного подтверждения качества ведения ими образовательной деятельности.

С целью повышения качества образования, являющегося важнейшей задачей вузов Минобороны России, реализуются внутривузовские системы качества образования, построенные на базе требований нормативных документов Минобороны России.

Следует отметить, что сертификация СМК образовательных организаций (в первую очередь для вузов Минобороны России) не является обязательной. Но целесообразным можно считать использование при разработке ВСОКО реализацию таких принципов СМК, как использование процессного и системного подхода, а также принятие решений, основанных на фактах [3].

*Качество образования* – это комплексная характеристика образовательной деятельности и подготовки обучающихся. Она должна отражать степень их соответствия федеральным государственным образовательным стандартам (далее – ФГОС) и степень достижения планируемых результатов образовательной программы [4]. В вузе Минобороны России в оценивании качества образования определяются два основных направления:

- 1) оценивание качества организации и ведения вузом Минобороны России всех видов деятельности;
- 2) оценивание качества подготовки военных кадров для Вооруженных Сил Российской Федерации на соответствие установленным требованиям.

## ОБОСНОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МОДЕЛИ ВСОКО

Образовательная деятельность по реализации основных профессиональных образовательных программ (далее – ОПОП) – это основной вид деятельности вуза Минобороны России, который осуществляется в тесной взаимосвязи с другими видами деятельности [5].

Обобщенная схема обеспечения образовательной деятельности вуза Минобороны России изображена на рис. 1. На схеме представлены основные виды деятельности вуза Минобороны России, оказывающие влияние на образовательную деятельность. Для оценки степени их влияния на качество образования необходимо определить все процессы и подпроцессы.



Рис. 1. Обобщенная схема обеспечения образовательной деятельности военно-учебного заведения Минобороны России



Разрабатывая ВСОКО, требуется сформировать перечень процессов и подпроцессов, которые необходимо контролировать для определения оценки качества образования. Данная задача решается путем формирования модели ВСОКО. Графически обобщенная схема модели ВСОКО изображена на рис. 2. Из существующих моделей она в достаточной степени отражает требования, предъявляемые к ВСОКО вуза Минобрнауки России.

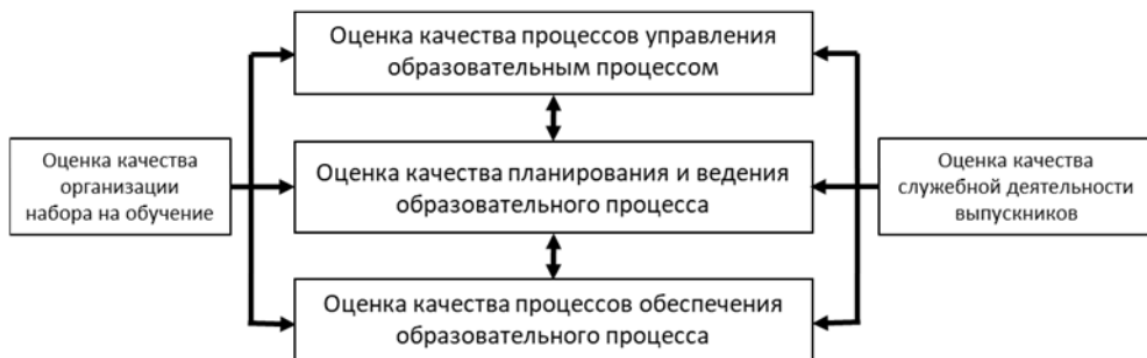


Рис. 2. Обобщенная схема модели внутренней системы оценки качества образования

Более подробно элементы модели ВСОКО представлены на рис. 3–7. При этом следует понимать, что состав подпроцессов может дополняться по результатам реализации ВСОКО.

Процесс П.1 представлен двумя подпроцессами П.1.1 и П.1.2 (рис. 4), которые характеризуют качество профессиональной подготовленности должностных лиц вуза и качество разработки и обеспечения образовательного процесса локальными актами вуза.

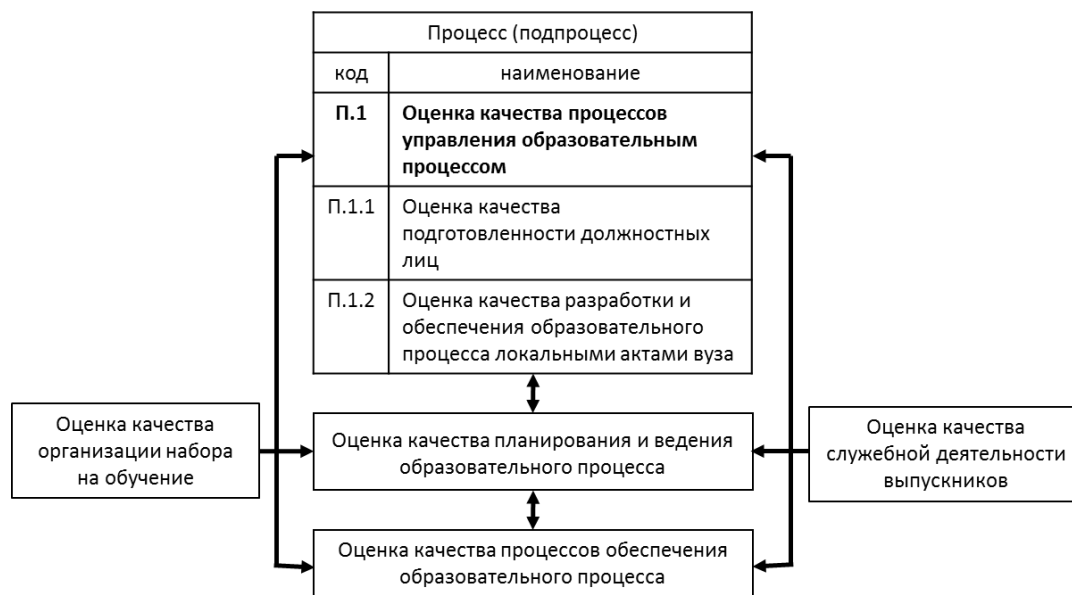


Рис. 3. Процесс П.1 «Оценка качества процессов управления образовательным процессом»

Оценка качества подготовленности должностных лиц должна проводиться в соответствии с методиками, общими для всех вузов Минобрнауки России, включая знание нормативных правовых основ системы военного образования, а также вопросов педагогики и психологии

высшей военной школы. Оценка качества подготовленности должностных лиц может осуществляться путем проведения тестирования, семинаров и индивидуальных собеседований.

Оценка качества разработки и обеспечения образовательного процесса локальными актами вуза должна обеспечить контроль охвата ими всех сфер деятельности вуза, оперативности их разработки или внесения в них соответствующих изменений.

Выход данного процесса определяют управляющие воздействия на организацию и ведение подразделениями вуза Минобороны России образовательной деятельности по реализации ОПОП.

Процесс П.2 представлен тремя подпроцессами П.2.1–П.2.3 (рис. 4), которые характеризуют деятельность вуза Минобороны России по совершенствованию профориентационной работы.

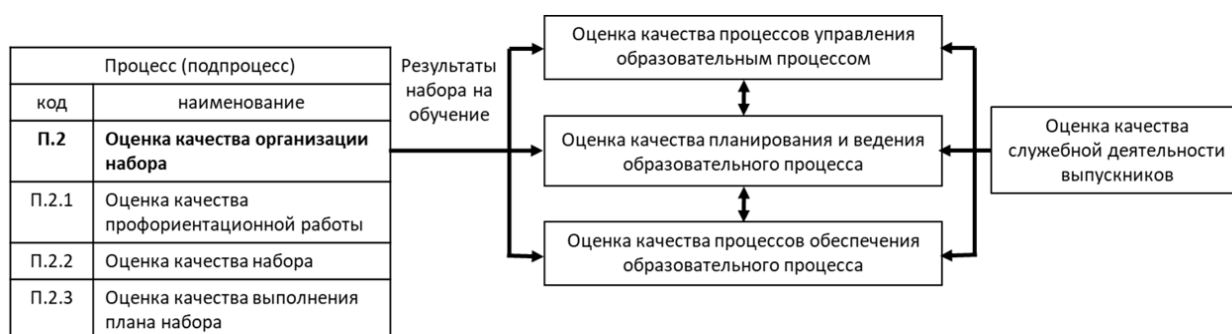


Рис. 4. Процесс П. 2 «Оценка качества организации набора»

Процесс П.3 включает шесть подпроцессов П.3.1–П.3.6 (рис. 5), оценивающих деятельность вуза по подготовке выпускников в соответствии с установленными требованиями.



Рис. 5. Процесс П.3 «Оценка качества планирования и ведения образовательного процесса»

Оценку качества планирования и ведения образовательного процесса целесообразно вести по специально разработанным листам оценки. В качестве примера в табл. 1 представлен фрагмент оценочного листа оценки качества разработки рабочей программы учебной дисциплины (подпроцесс П.3.1.2).

Таблица 1

## Оценка качества разработки рабочей программы учебной дисциплины

Составляющие показателя	Критерий оценивания показателя		Результат оценки, Б (баллы)
	описание	кол-во баллов	
П.3.1.2.1 Определение места и роли учебной дисциплины (модуля) в структуре ОПОП	соответствует требованиям	10	
	не соответствует требованиям	0	
П.3.1.2.2 Определение планируемых результаты освоения учебной дисциплины (модуля)	соответствует требованиям	20	
	не соответствует требованиям	0	
П.3.1.2.3 Определение содержания учебной дисциплины (модуля)	соответствует требованиям	20	
	не соответствует требованиям	0	
П.3.1.2.4 Определение учебно-методического и информационного обеспечения учебной дисциплины (модуля)	соответствует требованиям	10	
	не соответствует требованиям	0	
П.3.1.2.5 Определение методических указаний обучающимся по освоению учебной дисциплины (модуля)	соответствует требованиям	10	
	не соответствует требованиям	0	
П.3.1.2.6 Определение методических указаний преподавателю по порядку подготовки и проведения учебных занятий, текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по учебной дисциплине (модулю)	соответствует требованиям	10	
	не соответствует требованиям	0	
П.3.1.2.7 Определение учебно-материальной базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по учебной дисциплине (модулю)	соответствует требованиям	10	
	не соответствует требованиям	0	
П.3.1.2.8 Определение фонда оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по учебной дисциплине (модулю)	соответствует требованиям	10	
	не соответствует требованиям	0	
<b>Итоговая оценка показателя П3.3, баллы (соответствие, %)</b>			<b>100</b>

При оценке качества рабочей программы учебной дисциплины проверяется ее соответствие ФГОС и квалификационным требованиям, учебному плану и матрице компетенции по специальности подготовки, а также требованиям нормативных и локальных актов по разработке (обновлению) образовательных программ.

Критерий общей оценки значения показателя П.3.1.2:

высокий уровень – более 80 баллов – требуется (при необходимости) уточнение содержания отдельных разделов;

средний уровень – от 60 до 80 баллов – требуется внесение незначительных изменений;

низкий уровень – менее 60 баллов – требуется внесение значительных изменений.

Примечание:

максимальное значение показателя П.3.1.2 – 100 баллов;

итоговое значение показателя П.3.1.2 определяется как сумма баллов по его составляющим П.3.1.2.1–П.3.1.2.8.

Критерий общей оценки значения показателя П.3.1:

высокий уровень – более 80 баллов – требуется (при необходимости) уточнение содержания отдельных разделов;

средний уровень – от 60 до 80 баллов – требуется внесение незначительных изменений;

низкий уровень – менее 60 баллов – требуется внесение значительных изменений.

Примечание:

максимальное значение показателя П.3.1 – 100 баллов;

итоговое значение показателя П.3.1 – среднее значение сумм баллов по П.3.1.1–П.3.1.3.

Показатель П.3 оценивается по специальности, за факультет и за вуз в целом.

Критерий общей оценки значения показателя П.3:

высокий уровень – более 80 баллов – требуется (при необходимости) уточнение отдельных элементов образовательной программы на уровне прав кафедр;

средний уровень – от 50 до 80 баллов – требуется внесение незначительных изменений на уровне прав вуза;

низкий уровень – менее 50 баллов – требуется внесение значительных изменений на уровне прав вуза.

Примечание:

максимальное значение показателя П.3 – 100 баллов;

итоговое значение показателя П.3 определяется как среднее значение сумм баллов оценки по его составляющим П.3.1–П.3.6.

Значения данного показателя должны использоваться также и при проведении анализа служебных отзывов на выпускников вуза Минобороны России, определяющих оценку качества их служебной деятельности (процесс П.4).

Процесс П.4 представлен двумя подпроцессами П.4.1 и П.4.2 (рис. 6), характеризующими оценку военно-профессиональных качеств выпускников и качество представления служебных отзывов на них.

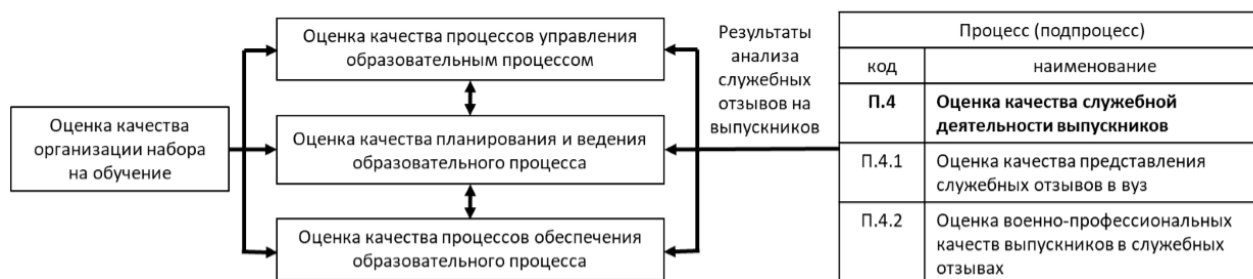


Рис. 6. Процесс П. 4 «Оценка качества служебной деятельности выпускников»

Результаты оценки данного процесса необходимы для совершенствования деятельности вуза посредством актуализации локальных актов, внесения корректив в организацию образовательной, методической и научной (научно-исследовательской) деятельности и военно-политическую работу вуза.

Процесс П.5 представлен четырьмя подпроцессами П.5.1–П.5.4 (рис. 7), которые характеризуют все виды обеспечения образовательного процесса.

Особое место в оценке деятельности кафедр следует отвести оценке качества кадрового и информационно-методического обеспечения.

Описание модели ВСОКО необходимо конкретизировать назначением руководителей каждого процесса, а также определить сроки проведения контроля и фиксацию его результатов, для улучшения качества процессов по результатам контроля установить порядок обратной связи.

Данное описание целесообразно выполнять в форме таблицы, пример которой представлен на рис. 8.

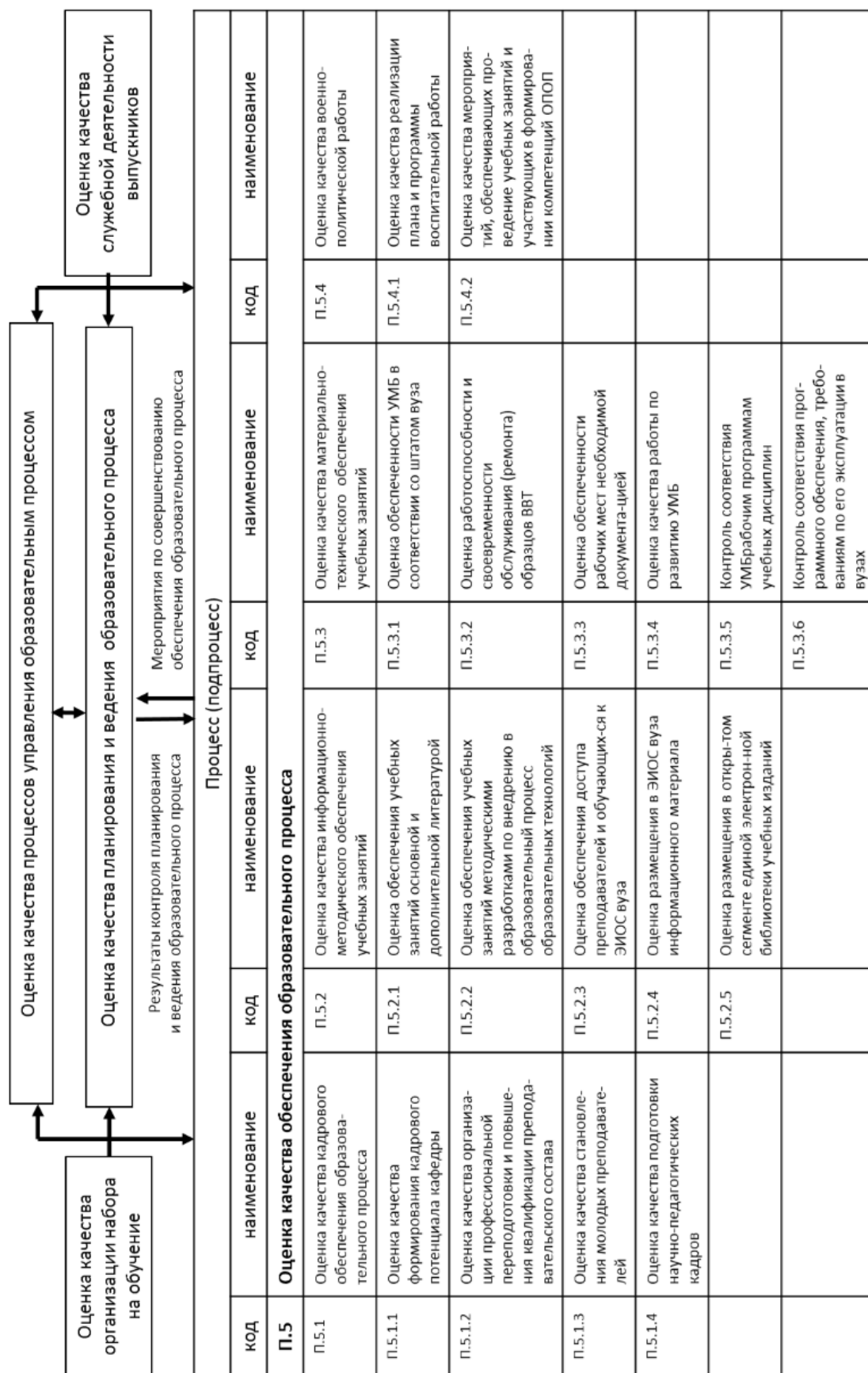


Рис. 7. Процесс П.5 «Оценка качества обеспечения образовательного процесса»

Код процесса (подпроцесса)	Наименование процесса (подпроцесса)	Руководитель процесса (подпроцесса)	Сроки контроля	Фиксация результатов	Обратная связь (улучшение)
1	2	3	4	5	6

Рис. 8. Табличное представление структуры внутренней системы оценки качества образования

В таблицу целесообразно включить следующие графы, в которых необходимо указать:

- в графе 1 «Код процесса (подпроцесса)» – условное обозначение процессов и подпроцессов;
- в графе 2 «Наименование процесса (подпроцесса)» – полное наименование каждого процесса или подпроцесса;
- в графе 3 «Руководитель процесса (подпроцесса)». – штатные должности лиц, ответственных за реализацию процессов (подпроцессов);
- в графе 4 «Сроки контроля» – планируемые сроки проведения контроля выполнения процессов (подпроцессов);
- в графе 5 «Фиксация результатов» – какие средствами и каким образом планируется оценивание качества процессов (подпроцессов), показатели и критерии оценивания;
- в графе 6 «Обратная связь (улучшение)» – какие мероприятия следует выполнять для устранения выявленных недостатков.

## МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВСОКО

В модели ВСОКО взаимодействие подразделений и должностных лиц, принимающих участие в реализации ВСОКО, необходимо определить локальным актом вуза Минобороны России – Положением о ВСОКО.

Примерная схема взаимодействия подразделений и должностных лиц в ВСОКО показана на рис. 9.

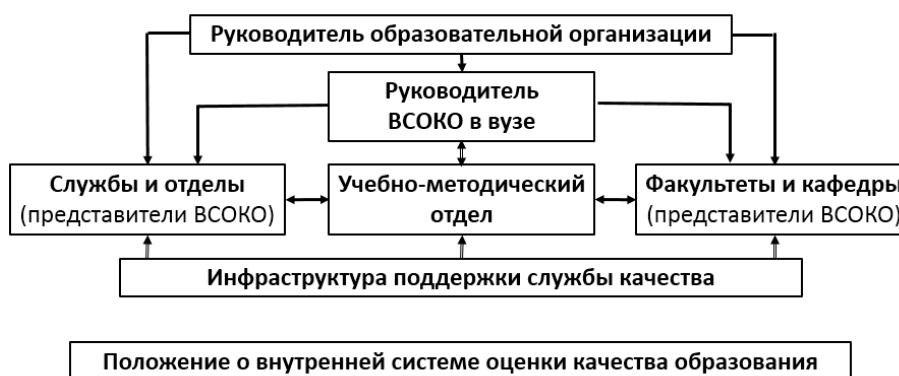


Рис. 9. Схема взаимодействия подразделений и должностных лиц

Положением о ВСОКО целесообразно определить общие требования к планированию качества образования и его организации, а также по проведению в подразделениях внутренней оценки и мониторингу их деятельности.

Положение о ВСОКО – это локальный акт вуза Минобороны России, который должен закрепить структуру ВСОКО и фиксировать систему организации проведения ее процедур, участников процессов и их ответственность.

В разделах Положения необходимо определить требования и мероприятия вуза по внутренней оценке качества образования. Внутренняя оценка качества образования должна включать независимую оценку показателей и проведение самообследования.

Для проведения внутренней оценки целесообразно разработать оценочные листы, которые должны определить оценку качества выполняемых работ в вузе от приема на обучение до выпуска из вуза, включая все виды обеспечения образовательного процесса и деятельности постоянного и переменного составов.

Одним из элементов в оценке качества образовательной деятельности вуза является проведение анкетирования обучающихся и преподавателей по специально разработанным анкетам, которые включают:

– оценки обучающимися качества работы преподавателей по учебным дисциплинам текущего учебного года, а также условий реализации образовательных программ и организации образовательного процесса;

– оценки преподавателями качества условий реализации образовательной деятельности.

Сроки проведения внутренней оценки целесообразно определять локальным актом вуза с указанием ответственных исполнителей и представляемых материалов.

Самообследование необходимо организовывать по завершению учебного года.

Формы оценочных листов и отчета о самообследовании должны быть определены в Положении о ВСОКО. При этом необходимо определить процедуру внесения изменений в данное Положение.

Материалы внутренней оценки и самообследования подлежат проведению анализа и должны быть использованы для совершенствования образовательной деятельности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В академии проведены научные исследования по разработке модели ВСОКО, в результате которых обоснована, разработана и апробирована рассмотренная в статье модель ВСОКО, а также подготовлены предложения и практические рекомендации по ее внедрению и реализации в деятельности академии.

Внедрение ВСОКО в деятельность вуза Минобороны России позволит определить процессы, требуемые для управления качеством образования, обеспечить и провести мониторинг и анализ этих процессов, а также принять решения для достижения запланированных результатов.

## **Список используемых источников**

1. Об утверждении аккредитационных показателей по образовательным программам высшего образования, методики расчета и применения аккредитационных показателей по образовательным программам высшего образования : приказ Минобрнауки России от 18.04.2023 № 409. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403024117/?ysclid=m2kqf7p7ek76454915> (дата обращения: 01.03.2024).

2. Методические рекомендации по внедрению типовой модели системы качества образовательного учреждения. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ, 2006. – 408 с.

3. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь : [утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 28.09.2015 № 1390-ст : дата введения 28.09.2015] / подготовлен

Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (ОАО «ВНИИС») на основе аутентичного перевода на русский язык международного стандарта, указанного в пункте 4; перевод выполнен рабочей группой в составе представителей ОАО «ВНИИС», ООО «Интерсертифик – ТЮФ», ЗАО «Центр «Приоритет», Ассоциации по сертификации «Русский регистр», ООО «ТЮФ Интернациональ РУС», ООО «Би-Эс-Ай Эм-Эс-Си-АйЭс», «AE Conformity Pty Ltd», Международной ассоциации по сертификации персонала : [изд. офиц.]. – М. : Стандартиформ, 2015. – 53 с.

4. Российская Федерация. Законы. Об образовании в Российской Федерации : федеральный закон № 273-ФЗ : [принят Государственной думой 21.12.2012 : одобрен Советом федерации 26.12.2012]. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_140174/?ysclid=ltvt9qw8p8](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/?ysclid=ltvt9qw8p8) (дата обращения: 01.03.2024).

5. Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации : приказ Министерства обороны Российской Федерации от 30.05.2022 № 308 // ГАРАНТ.РУ : информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/prime/doc> (дата обращения: 29.08.2024).



Н. С. Кужекин,  
*кандидат философских наук, профессор;*  
В. В. Мышко,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
В. А. Чикуров,  
*кандидат технических наук, доцент*

## **О ПОДГОТОВКЕ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМ КОМПЕТЕНЦИЯМ**

В статье рассматривается концептуальный подход к формированию учебного плана подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий с учетом изменчивости требований к профессиональным компетенциям обучаемых офицеров-выпускников, исходя из опыта решения проблемных вопросов, возникавших при разработке основных профессиональных образовательных программ и учебных планов в современных условиях.

Ключевые слова: основная профессиональная образовательная программа, учебный план, модель подготовки специалиста, информационные технологии.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Попытки санкционного воздействия коллективного Запада на функционирование многих отраслей российской экономики заставили критически отнестись к действующей системе высшего образования. К числу негативных последствий такого воздействия можно отнести закрытие доступа для российских исследователей к международным базам данных *Scopus* и *Web of Science*. Также сегодня в российском академическом сообществе идет активное обсуждение последствий интеграции России в европейскую систему образования, переход российской высшей школы на двухуровневую Болонскую систему образования.

Сейчас становится ясно, что большинство работодателей России не воспринимают бакалавриат как полноценный уровень образования. При этом системе военного образования удалось сохранить традиционный подход в рамках подготовки специалиста. Однако приходится прикладывать значительные усилия по недопущению снижения качества образования вследствие трансформации национальной системы образования. Решающим фактором, который позволяет сохранять военное образование на высоком уровне, является тот факт, что результатами освоения выпускниками основных профессиональных образовательных программ стали сформированные компетенции, установленные федеральными государственными образовательными стандартами и квалификационными требованиями к военно-профессиональной подготовке выпускников. Тем не менее, определенная проблема состоит в том, что последние характеризуются высокой динамикой изменений.

Колоссальные изменения произошли и происходят до сих пор с учетом влияния новых технологий на деятельность высших учебных заведений. Трудно переоценить – настолько стремительно и кардинально они меняют сами процессы и формы взаимодействия между участниками этих процессов. В условиях цифровой трансформации общества цифровизация становится ведущим трендом, определяющим уровень развития сферы высшего образования.

На наш взгляд, анализ текущего состояния и перспектив применения IT-технологий, а также практических реализаций методов, алгоритмов и методик по основным направлениям военно-космической деятельности показал, что решение широкого круга военно-прикладных задач управления космическими средствами, при испытаниях и эксплуатации космических средств, не в полной мере соответствует современным требованиям.

## **АКТУАЛИЗАЦИЯ УЧЕБНЫХ ПЛАНОВ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Очевидный факт, что в любой военной деятельности используются информационные технологии (ИТ-технологии), объем которых неизменно растет [1, 2]. Решение различных задач – от сбора информации до управления средствами поражения – невозможно без таких технологий.

В настоящее время, исходя из потребности войск, встает вопрос об актуализации квалификационных требований к военно-профессиональной подготовке выпускников и реализуемых в вузах основных профессиональных образовательных программ в части, касающейся подготовки военных специалистов в области ИТ-технологий на основе анализа опыта боевого применения и обеспечения боевых действий войск (сил) при выполнении задач в ходе специальной военной операции и за пределами территории Российской Федерации, отзывов на выпускников вузов из войск (сил), а также организации обучения с использованием электронных образовательных ресурсов, в том числе с применением технологий искусственного интеллекта [3, 4].

К сожалению, в условиях повсеместной информатизации процесса образования сложилась ситуация, когда отсутствует единый подход к подготовке ИТ-специалистов. Кафедры вуза, осуществляющие подготовку специалистов политехнического профиля, в рамках предоставленных вузам полномочий при формировании дисциплин по выбору берут на себя ответственность и на свое усмотрение разрабатывают учебные программы. Это неизбежно приводит к дублированию одного и того же материала при изучении разных дисциплин и не совсем правильному толкованию понятий в данной предметной области.

Основной причиной отсутствия единого способа понимания и трактовки каких-либо понятий является отсутствие единой концепции. Каждая выпускающая кафедра стремится воплотить свою точку зрения на методику обучения в рамках тех квалификационных требований, которые предъявляет заказчик подготовки.

В условиях вхождения в период разработки новых стандартов важно сформировать такой подход к подготовке военных специалистов в области информационных технологий, который будет обязательным для всех, который будет отвечать современным требованиям к выпускникам вузов. Вместе с тем специалисты, подготовленные на его основе, будут способны эксплуатировать построенные на новых принципах передовые образцы вооружения и военной техники, в том числе с элементами искусственного интеллекта.

По мнению авторов, на сегодняшний день повышение эффективности подготовки специалиста в области информационных технологий требует поиска путей решения важной стратегической задачи совершенствования образовательного процесса [5]. Это невозможно без формирования стратегий действий при подготовке специалистов вузов политехнического профиля.

Программы для всех специальностей и направлений подготовки в отношении базовых информационных технологий содержат практически стандартный набор учебных дисциплин, из которых некоторые для этих специальностей избыточны. В то же время, для того чтобы обеспечить выполнение требований Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) и квалификационных требований к военно-профессиональной подготовке выпускников (КТ), некоторые ключевые дисциплины из-за ограниченного бюджета времени могут практически исчезать. Причин такого положения несколько. Одна из них – растущая диверсификация ИТ-технологий. Круг областей их применения стремительно расширяется, что, в свою очередь, влечет за собой увеличение разнообразия самих информационных технологий. В результате перечень решаемых задач, информационных систем и информационных ресурсов в разных областях применения ИТ-технологий столь различен, что знание одной сферы применения ИТ-технологий лишь в малой степени помогает овладеть знаниями в другой сфере.

Информационная компетентность является определяющим понятием при создании единого подхода к непрофильному образованию. Она включает в себя набор знаний, умений и навыков в IT-сфере, но не ограничивается простой их совокупностью.

Возникает вопрос, как организовывать и проводить подготовку современных офицерских кадров, квалификация которых будет позволять решать задачи в области информационных технологий, каковы должны быть объем и содержание учебных дисциплин, чему и как правильно учить, каким образом удовлетворить спрос в IT-специалистах в войсках.

Концептуальный подход к формированию учебного плана подготовки специалиста в области информационных технологий заключается в том, что подготовка соответствующих офицерских кадров может развиваться как минимум по двум направлениям:

*первое направление* – подготовка профессиональных IT-специалистов в военно-учебных заведениях для решения конкретных задач, связанных с будущей профессиональной деятельностью выпускников в области информационных технологий и установление оптимальных пропорций между уровнями подготовки военных специалистов;

*второе направление* – подготовка профильных специалистов вуза, которые используют IT-технологии в своей профессиональной деятельности, однако получающие непрофильное базовое IT-образование (непрофильных IT-специалистов, обладающих конкретной специализацией, связанной с применением и эксплуатацией вооружения и военной техники – специалистов-«предметников»), способных в кратчайшие сроки овладеть необходимыми навыками для оперативного решения задач, которые возникают или могут возникнуть в динамично изменяющейся обстановке в процессе разработки и эксплуатации современных образцов вооружения и военной техники.

Особенностью обоих направлений служит возможность разделения на три уровня подготовки: базовый, профессиональный и расширенный (исследовательский).

Овладение базовым уровнем означает, что обучающийся:

– знает основные информационные процессы и ресурсы в обществе и конкретной предметной области;

– владеет компетентностью в области использования IT-технологий для получения доступа к информационным ресурсам;

– имеет навыки использования распространенных IT-технологий для поддержки типовых информационных процессов: сбора, хранения, обработки и представления информации.

Получение профессионального уровня означает, что обучающийся:

– хорошо знает информационные процессы конкретной предметной области, составляющие предмет его специализации, а также IT-технологии, применяющиеся для поддержки этих процессов;

– обладает компетентностью в области использования IT-технологий для решения задач своей предметной области;

– обладает навыками применения современных информационных технологий и систем для решения конкретных задач своей предметной области.

Достижение расширенного (исследовательского) уровня означает, что обучающийся:

– обладает фундаментальными знаниями об информационных процессах конкретной предметной области;

– обладает компетентностью в области оценки необходимости внесения изменений в существующие информационные процессы для достижения конкретных профессиональных целей;

– имеет навыки постановки и решения конкретных задач по изменению или созданию новых информационных процессов и IT-технологий.

Таким образом, актуализация подготовки IT-специалистов и непрофильных IT-специалистов, использующих в своей профессиональной деятельности IT-технологии в самом общем виде, может быть представлена, как показано на рис. 1. Целью реализации дополнительной профессиональной программы повышения квалификации являются совер-

шенствование компетенций, необходимых для профессиональной деятельности и повышение профессионального уровня в рамках имеющейся квалификации по организации эксплуатации вооружения и военной техники.

Принципиальным в организации подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий является правильное определение «точки входа» IT-технологии в конкретную предметную сферу. Такой точкой входа может служить модель процесса, представляющего главную сущность предметной области. Например, для образования – учебный процесс, для управления космическими средствами – процесс анализа телеметрической информации и т. д.

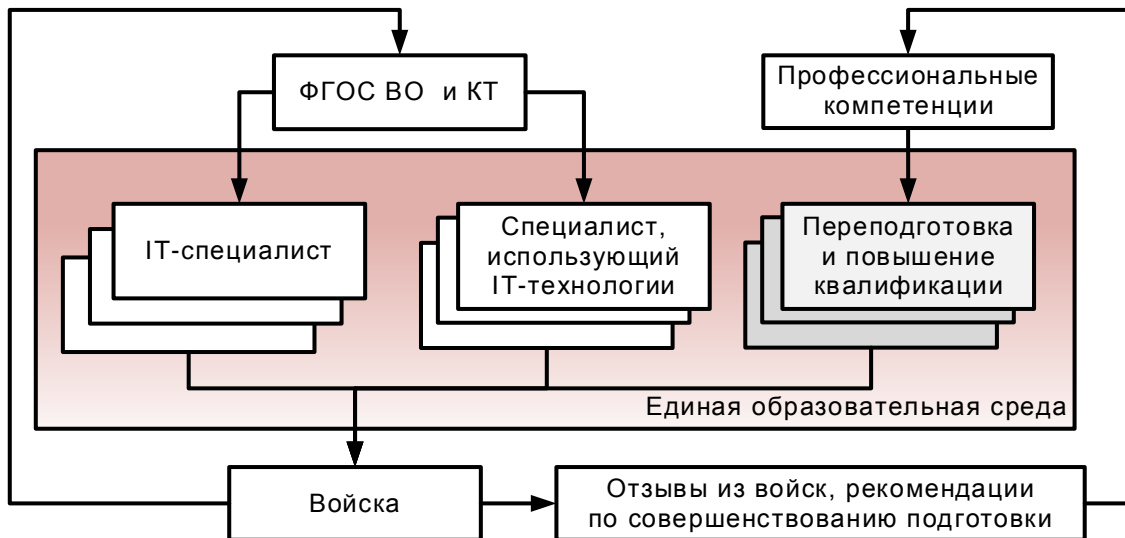


Рис. 1. Подготовка специалиста в политехническом вузе

Сейчас невозможно сформировать уникальную программу для проведения образовательного процесса, так как существуют тесные связи между отдельными специальностями и специализациями. Поэтому при организации подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий целесообразно пользоваться предложенной в работе [6] моделью, учитывающей связи основных образовательных программ высшего образования (ОПОП ВО) для укрупненной группы специальностей/направлений (рис. 2).

При более детальном рассмотрении единой образовательной среды подготовки специалистов политехнического профиля получим в виде кортежа представление общего вида модели ОПОП высшего образования для УГСН подготовки военных специалистов

$$M_{\text{УГСН}} = \langle Z, O, K, I, B, V, \varphi, \psi \rangle, \quad (1)$$

где  $M_{\text{УГСН}}$  – модель ОПОП для специальностей, входящих в УГСН;

$Z$  – множество задач профессиональной деятельности,  $Z = \{Z_i \mid i = \overline{1, m}\}$ ;

$O$  – множество примерных основных образовательных программ высшего образования,  $O = \{O_u \mid u = \overline{1, g}\}$ ;

$K$  – множество компетенций;  $K = \{K_j \mid j = \overline{1, n}\}$ ;

$I$  – множество индикаторов,  $I = \{I_{ij} \mid i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}$ ;

- В** – множество учебных дисциплин (практик), входящих в обязательную часть ОПОП по специальности,  $\mathbf{V} = \{B_{j_{\text{Баз}}} \mid j_{\text{Баз}} = \overline{1, n_{\text{Баз}}}\}$ ;
- V** – множество учебных дисциплин (практик), выбранных самостоятельно участниками образовательных отношений,  $\mathbf{V} = \{V_{j_{\text{Вар}}} \mid j_{\text{Вар}} = \overline{1, n_{\text{Вар}}}\}$ ;
- $\Phi, \Psi$  – операторы, описывающий учебный процесс.

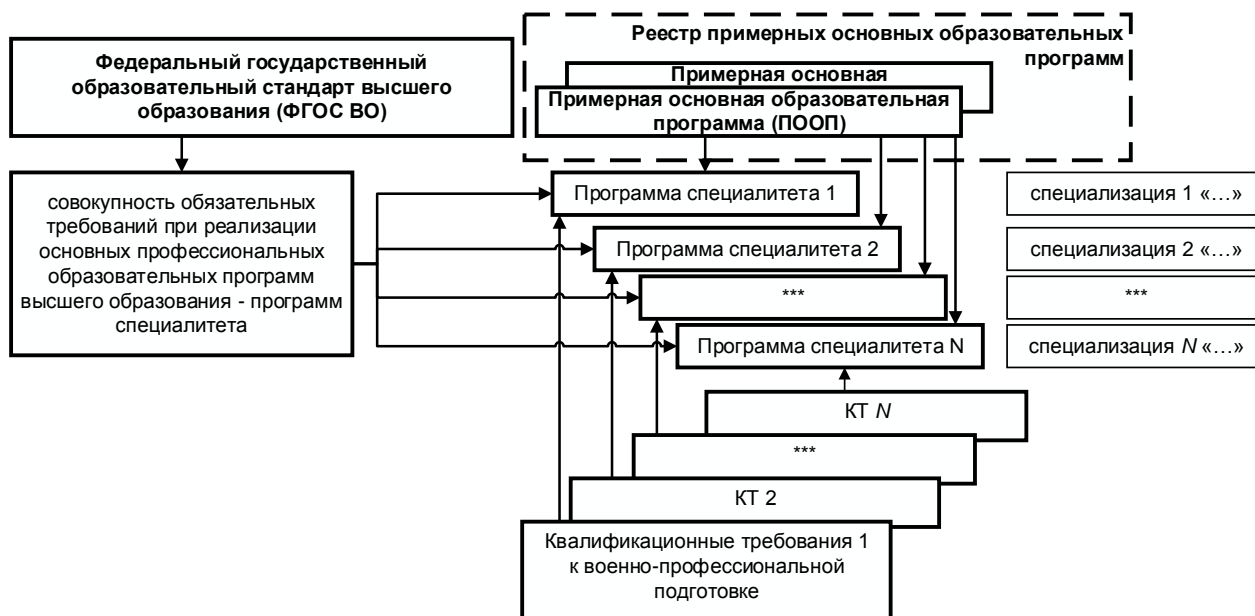


Рис. 2. Связь ОПОП ВО в рамках укрупненной группы специальностей/направлений

При этом необходимо выделить «относительно стабильное ядро» и «мобильную оболочку», которые характерны для обоих направлений (подготовки ИТ-специалистов и специалистов, получающих непрофильное ИТ-образование). Представление организации учебного процесса подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий в структурированном виде типа «ядро-оболочка» (рис. 3) позволяет своевременно перестроить образовательный процесс для более полного удовлетворения возникающим в современной динамично изменяющейся обстановке требованиям и для решения задачи подготовки современных офицерских кадров в области ИТ-технологий на высоком уровне.

Ядро подготовки любого специалиста составляет примерно две трети от объема общей трудоемкости основной образовательной программы, выделяемой на изучение дисциплин **В**, входящих в обязательную часть, в то время как на вариативную составляющую **V** остается одна часть указанной трудоемкости.

Определение состава учебных дисциплин, как обязательной, так и вариативной частей образовательных программ, целесообразно начать с выработки единой стратегии формирования необходимых компетенций **К** и распределения бюджета времени, выделяемого на изучение дисциплин.

Неоднородное адаптированное «ядро» подготовки ИТ-специалистов и непрофильных специалистов составляют дисциплины, которые изучаются на младших курсах и формируют фундамент тех знаний, которые необходимы всем без исключения специальностям высшего образования.

Планируемыми результатами освоения учебных дисциплин «гуманитарного, социально-экономического цикла», входящих в «универсальное» или «фундаментальное» ядро, является формирование универсальных компетенций, например: УК-1–УК-11. Такие компетенции

можно отнести к категориям: «системное и критическое мышление», «командная работа и лидерство», «межкультурное взаимодействие», «самоорганизация и саморазвитие (в том числе здоровьесбережение)». К компетенциям обучаемых офицеров-выпускников, входящим в «фундаментальное» ядро, относятся профессионально-специализированные компетенции, такие как способность использовать результаты анализа современных проблем войны и армии при решении задач военно-профессиональной деятельности, а также способность проводить основные мероприятия военно-политической работы в подразделении, что в последнее время приобретает значительную актуальность.

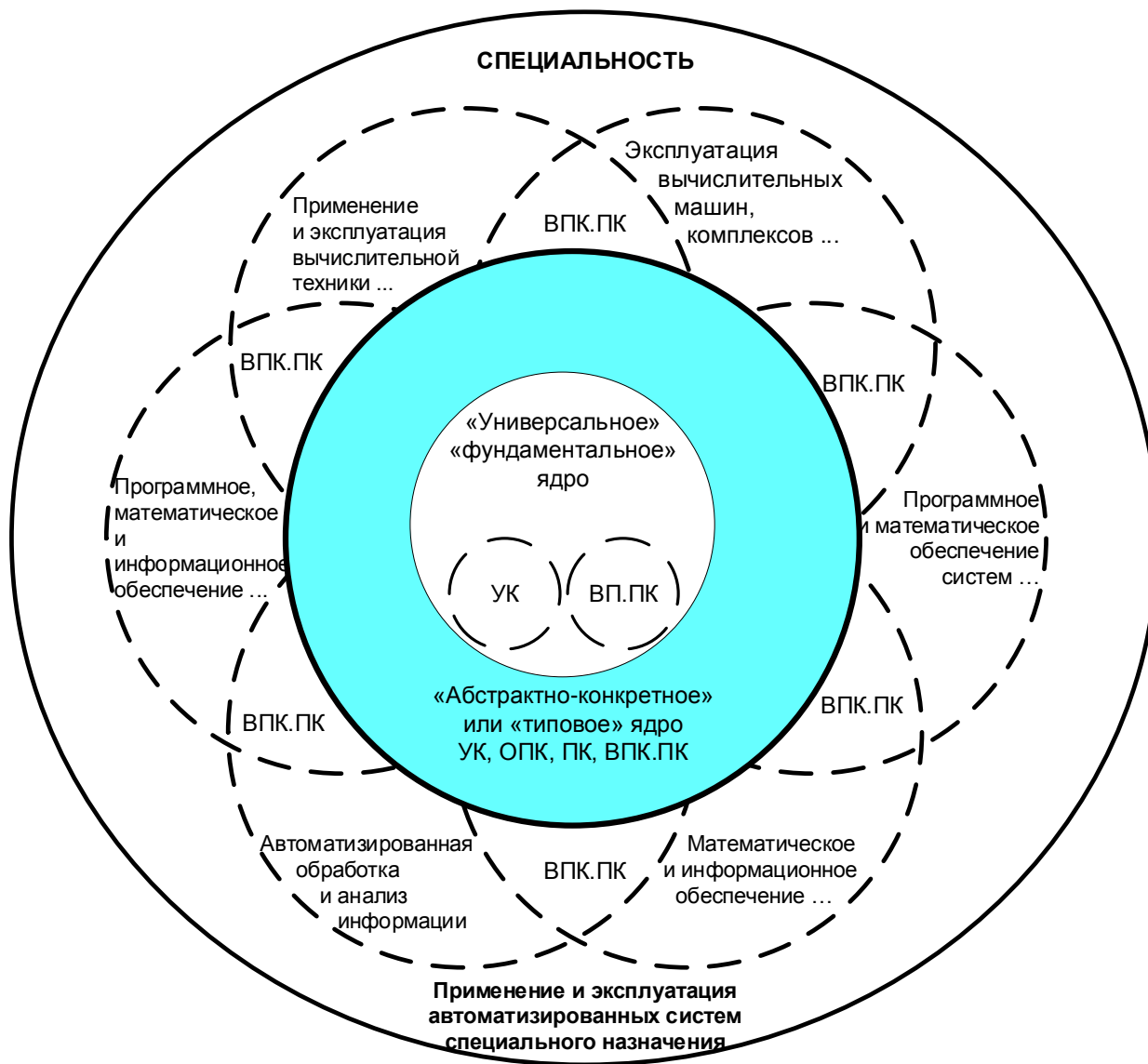


Рис. 3. Структура подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий типа «ядро-оболочка»

Планируемыми результатами освоения учебных дисциплин «математического и естественнонаучного цикла», входящих в «абстрактно-конкретное» или «типичное» ядро, является формирование общепрофессиональных компетенций, например: ОПК–ОПК-4. Такие компетенции можно отнести к категориям: «научное мышление», «исследовательская деятельность», «владение информационными технологиями», «компьютерная грамотность». Подготовка IT-специалистов предполагает обязательное освоение компетенций, которые форми-

руют «абстрактно-конкретное» ядро, в ходе изучения учебных дисциплин «математического и естественнонаучного цикла», а также дисциплин профессионального цикла, формирующих область профессиональных знаний как ИТ-специалистов, так и непрофильных специалистов, которые используют в своей профессиональной деятельности ИТ-технологии.

Особенностью «абстрактно-конкретного» ядра является тот факт, что при подготовке непрофильных специалистов, использующих в своей деятельности ИТ-технологии, ряд дисциплин может изучаться с другим бюджетом времени, либо дисциплины могут приобретать модульный или междисциплинарный характер и могут носить специфическое наименование. Время на изучение и объем знаний в области ИТ-технологий, входящих в «ядро» подготовки непрофильных специалистов, в учебном плане предполагаются, как правило, в меньшем объеме, при этом целью их изучения является формирование единой области знаний в рамках образовательной среды (профессиональной сферы деятельности).

«Мобильную оболочку» составляют дисциплины, в процессе изучения которых формируются «знания», «умения» и «навыки», отвечающие квалификационным требованиям заказчика подготовки специалиста. Планируемыми результатами освоения учебных дисциплин, входящих в оболочку, является формирование «конкретных» профессиональных компетенций: установленных примерной основной образовательной программой, направленных на решение определенных типов задач профессиональной деятельности (научно-исследовательских, технологических, организационно-управленческих), например: ПК-1, ПК-5, ПК-11, а также установленных квалификационными требованиями к военно-профессиональной подготовке выпускников (профессионально-специализированных компетенций): ПСК-1, ПСК-2; военно-профессионально ориентированных профессиональных компетенций, направленных на решение определенных типов задач профессиональной деятельности по КТ, например: эксплуатационных, служебных (боевой и повседневной деятельности, военно-политической работы): ВПК.ПК-1–ВПК.ПК-10.

Мобильная «конкретная» оболочка, окружающая ядро, характеризует конкретную специализацию и в наибольшей степени может учитывать динамику изменений квалификационных требований к компетенциям обучаемых офицеров-выпускников (рис. 4). Поэтому, в отличие от дисциплин, которые изучаются в составе укрупненной группы специальностей, в «мобильную оболочку» входят дисциплины, существенно выделяющие конкретную подготовку специалистов, – «дисциплины специализации», которые входят в вариативную часть учебного плана.

Приказом начальника вуза реализация основных профессиональных образовательных программ по специальностям и отдельных учебных дисциплинам закрепляется за соответствующими кафедрами. По мнению авторов, для повышения эффективности подготовки любого специалиста дисциплины «фундаментального» и «абстрактно-конкретного» ядра должны обеспечиваться едиными учебно-методическими материалами. Кроме того, занятия по таким дисциплинам должны проводиться соответствующими закрепленными профильными кафедрами, преподаватели которых обладают высокой квалификацией и являются ведущими специалистами в преподаваемой предметной области.

Исходя из складывающихся условий, каждая образовательная программа должна отвечать определенным требованиям. Так, например, современные ИТ-технологии требуют при подготовке по направлению «Информатика и вычислительная техника» специалистов различных специализаций выделять в учебных планах отдельные учебные программы, которые способствуют решению или как минимум предлагают пути решения на практике основных проблемных вопросов применения современных технологий искусственного интеллекта в военно-космической деятельности [4, 7, 8].

Развитие и противоборство национальных технологий, в ближайшей перспективе, потребуют широкого внедрения технологий искусственного интеллекта в перспективных образцах вооружения и последующего их использования в повседневной практике применения войск (сил). А это значит, что при подготовке специалиста в области информационных технологий

обязательной частью становится потребность освоения дисциплин, которые формируют область профессиональных знаний и раскрывают новейшие технологии, в том числе технологии искусственного интеллекта.

Важную роль при подготовке военных специалистов в области информационных технологий играют выявление структурно-логической взаимосвязи и определение места каждой дисциплины и кафедры в формировании компетенций, которые необходимы конкретному специалисту. В частности, модель, предложенная в работе [6], позволяет не только сформировать основную профессиональную образовательную программу высшего образования для укрупненной группы специальностей/направлений 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника» по специальности 09.05.01. «Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения», но и на базе ключевых принципов позволяет учитывать изменения требований к компетенциям обучающихся.



Рис. 4. Дисциплины специализации по направлению «Информатика и вычислительная техника»

Например, исходя из потребности войск, образовательная организация актуализирует требования к профессиональной компетенции  $K_j$  для решения задач  $Z_i$  профессиональной деятельности, а именно к минимуму содержания и уровням обученности курсантов военных образовательных организаций по вопросам эксплуатации и применения робототехнических систем. В этом случае требуется перераспределение бюджета учебных дисциплин. Подготовка военных специалистов в области информационных технологий с учетом изменений может быть выполнена за счет сокращения общей трудоемкости одной или нескольких базовых учебных дисциплин  $V_{\text{Баз}}$  базового «ядра» и коррекции вариативной «оболочки» путем введения новой (или увеличения существующей) вариативной дисциплины  $V_{\text{Вар}}$ , выбранных самостоятельно участниками образовательных отношений при сохранении нормативных параметров по бюджету времени.

Для внесения изменений руководитель образовательной организации или его заместитель выдает необходимые указания на выполнение необходимых мероприятий по включению в



программы подготовки курсантов соответствующих вопросов эксплуатации и применения робототехнических систем.

Рациональный подход при актуализации компетентности будущих офицеров-выпускников, как правило, сталкивается с такими недостатками, как отсутствие в учебном плане одной или нескольких дисциплин, которые необходимы при подготовке IT-специалиста. Возможным вариантом решения данной проблемы могут стать:

- уменьшение объема других дисциплин из обязательной части (рис. 5);
- включение недостающих дисциплин в качестве модулей в другие дисциплины (рис. 6);
- декомпозиции с увеличением объема и расширения тематики (рис. 7);
- перемещение ряда дисциплин в вариативную часть (возможно, не для всех специализаций).

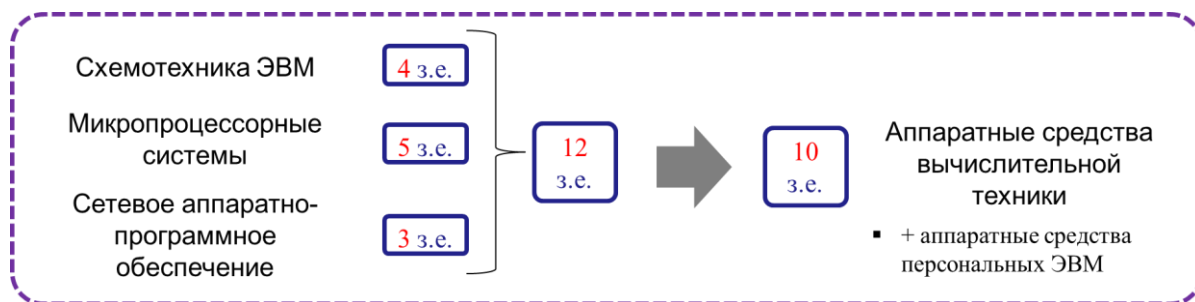


Рис. 5. Схема объединения дисциплин с уменьшением объема

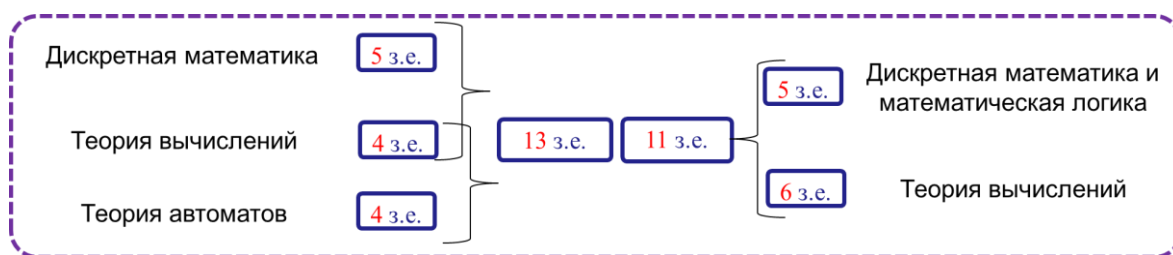


Рис. 6. Гибридная схема с уменьшением объема

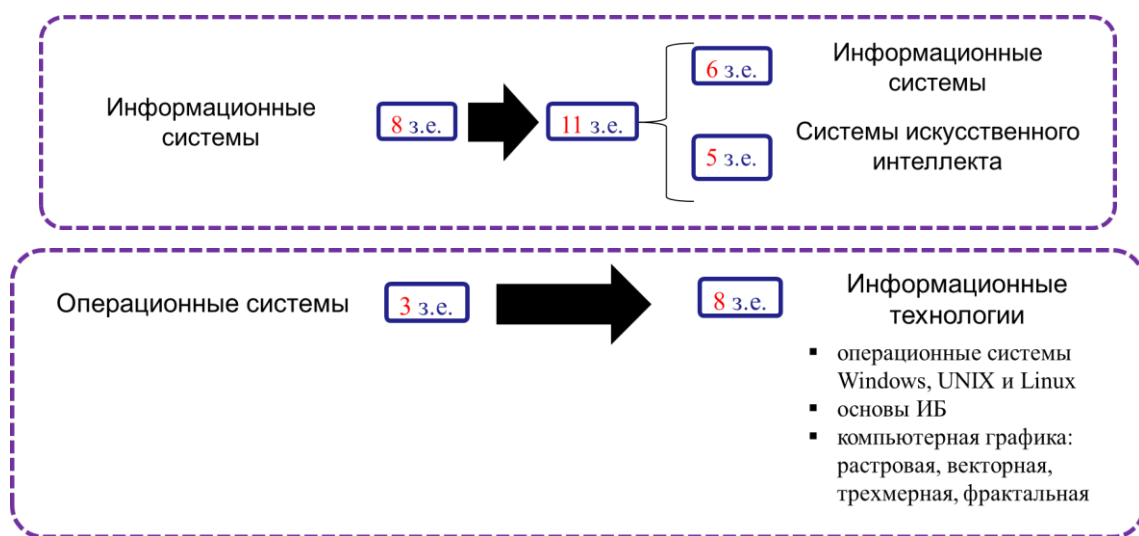


Рис. 7. Схемы декомпозиции с увеличением объема и расширения тематики

Таким образом, по мнению авторов, разграничение образовательной программы на неоднородное адаптированное «ядро» и вариативную «оболочку» способствует повышению качества подготовки военных специалистов в области информационных технологий.

Приведем примерное соотношение детализации подготовки – «IT-специалист» – «специалист-предметник» – «непрофильный специалист». В реальных условиях может отличаться, так как существуют определенные параметры применительно к конкретным основным профессиональным образовательным программам.

Для «чистых» IT-специалистов до 90% фундаментального ядра могут составлять дисциплины, формирующие компетенции, которые позволят выпускнику решать задачи профессиональной деятельности технологического типа, например задачу контроля качества аппаратного, программного и информационного обеспечения автоматизированных систем специального назначения.

Для специалистов-«предметников» до 60% фундаментального ядра могут составлять дисциплины, формирующие компетенции, которые позволят выпускнику решать задачи профессиональной деятельности в соответствии со специализацией, например задачу «автоматизированной обработки и анализа информации космических средств» – сбора, обработки и анализа данных (информации), полученных на основе использования телеметрической информации и результатов ее обработки.

Прочим специалистам, возможно, будет достаточно в состав фундаментального ядра включить до 30% дисциплин, связанных с освоением IT-технологий, которые позволят выпускнику решать задачи профессиональной деятельности, например задачу технического сопровождения элементов автоматизированных систем специального назначения.

В процессе формирования учебных планов подготовки военных специалистов следует выявить структурно-логические взаимосвязи с определением места каждой учебной дисциплины и назначить ответственных за формирование компетенций, которые необходимы конкретному специалисту. При этом часть дисциплин (фундаментальное ядро), несомненно, обеспечивают так называемые общеакадемические кафедры. Часть дисциплин (абстрактно-конкретное ядро) обеспечивают специальные кафедры или кафедры, ведущие подготовку в рамках укрупненной группы специальностей, однако с возможностью обеспечения различных уровней освоения (базового, профессионального и расширенного).

Как ни странно, но на дисциплины по специализации выпускающей кафедры при «наполнении» учебного плана остается ограниченное время, что объясняется необходимостью обеспечения поточности по ряду дисциплин, а также существующими ограничениями на общее количество экзаменов в семестре (не более пяти, не считая экзаменов на право вождения автомобиля и по физической подготовке) и зачетов (не более шести).

Ниже схематично представлен последовательный анализ структурно-логических взаимосвязей с определением места учебных дисциплин одного из учебных планов подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий (рис.8).

Учет изменчивости требований к профессиональным компетенциям позволит более тщательно подбирать учебный материал и организовать подготовку современного специалиста в области информационных технологий к деятельности, связанной как с военными космическими системами, так и с областью создания и применения космических комплексов двойного назначения, в полном соответствии с принятой «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года» [4].

Рассмотренный подход использовался при формировании учебного плана подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий со специализацией «автоматизированная обработка и анализ информации космических средств». Его эффективность подтверждается положительными отзывами на выпускников, полученными из войск.

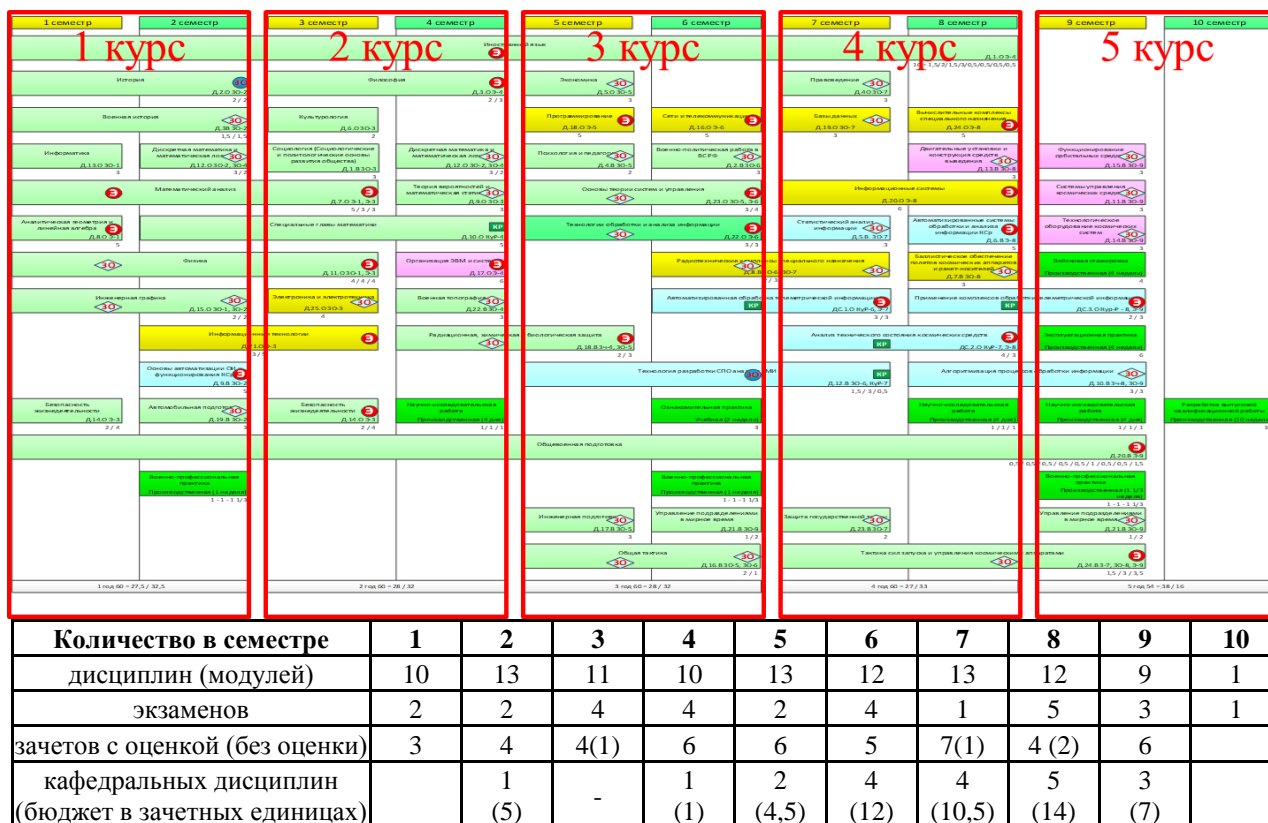


Рис. 8. Структурно-логические взаимосвязи с определением места учебных дисциплин

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущество предлагаемого подхода заключается в том, что он может быть полезен при очередной разработке учебных планов и программ учебных дисциплин.

Выделение в образовательной программе фундаментального ядра и вариативной части способствует более тщательному подбору учебного материала:

- определение объема и содержания учебных дисциплин;
- назначение ответственных за формирование необходимого объема знаний специалистов для решения конкретных задач, связанных с будущей профессиональной деятельностью выпускников в области инфокоммуникационных технологий согласно установленному перечню военно-учетных специальностей в военно-учебных заведениях;
- установление оптимальных пропорций между уровнями подготовки военных специалистов в области современных информационных технологий, способных в кратчайшие сроки овладеть необходимыми навыками для оперативного решения задач, которые возникают или могут возникнуть в динамично изменяющейся обстановке в процессе разработки и эксплуатации современных образцов вооружения и военной техники.

### Список используемых источников

1. Об организации образовательной деятельности в федеральных государственных организациях, осуществляющих образовательную деятельность и находящихся в ведении Министерства обороны Российской Федерации : приказ Министерства обороны Российской Федерации от 30.05.2022 № 308 // ГАРАНТ.РУ : информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/prime/doc> (дата обращения: 31.03.2024).

2. О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования : Указ Президента РФ от 12.05.2023 № 343. – URL: <https://www.garant.ru/hotlaw/federal/1623647/#review> (дата обращения: 31.03.2024).
3. Валерий Фальков: в основе любых изменений должна быть простая интегральная характеристика – качество образования. – URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/povosti-ministerstva/68132/> (дата обращения: 31.03.2024).
4. Искусственный интеллект в военно-космической деятельности : моногр. / А. А. Абдурахимов [и др.]; под общ. ред. М. М. Пенькова, И. В. Сахно, А. В. Назарова. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2022. – 544 с.
5. Кужекин Н. С., Мышко В. В., Чикуров В. А. Проблемы оптимизации технологии обучения курсантов при проведении занятий по военно-специальным дисциплинам // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 256–261.
6. Кужекин Н. С., Мышко В. В., Чикуров В. А. Модель формирования основной профессиональной образовательной программы высшего образования для укрупненной группы специальностей и направлений подготовки военных специалистов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 417–423.
7. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490. – URL: <https://www.kremlin.ru/acts/bank/44731> (дата обращения: 16.04.2024).
8. Технологии профессионально-ориентированного обучения : учеб. пособие / М. А. Голубев [и др.]; под ред. Н. С. Кужекина. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 136 с.

Д. А. Соловьев,  
кандидат технических наук, доцент

## СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ РУКОВОДЯЩИХ РАБОТНИКОВ В СФЕРЕ ПЕДАГОГИКИ ВЫСШЕЙ ВОЕННОЙ ШКОЛЫ

В статье рассмотрены проблемные вопросы создания и совершенствования системы подготовки руководителей педагогических и научных подразделений в академии.

Ключевые слова: система подготовки специалистов, переподготовка и повышение квалификации руководящего состава.

Российская высшая школа ощущает острую потребность в квалифицированных руководящих работниках. Кто и как становится руководителем педагогических и научных коллективов? Как правило, это выпускники адъюнктуры, своевременно защитившие диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук и проявившие способности в преподавательской (научной) деятельности, или руководитель, назначенный на должность из войск. Руководитель коллектива вуза – это главное действующее лицо в обучении и воспитании подчиненных преподавателей, научных работников, имеющий четкое представление о системе высшего образования, в том числе военного, о принципах внутривузовского устройства и управления коллективом, работы с педагогическими и научными работниками, адъюнктами, курсантами и слушателями. Именно руководитель структурного подразделения академии должен умело организовать образовательную, методическую и научную (научно-исследовательскую) деятельность подразделения, умело вести воспитательную работу. А готов ли он к руководящей деятельности и организации труда? Сколько времени потребуются, чтобы стать профессиональным руководителем педагогических или научных коллективов? Кто оказывает помощь в организации образовательной, методической и научной (научно-исследовательской) деятельности и воспитательной работы?

О подготовке руководителей вуза и научных работников написано немало исследований (Н. В. Кузьмина [1], Т. А. Вековцев [2], А. В. Барабанщиков, С. С. Муцынов [3], С. Д. Резник, О. А. Вдовина [4, 5]) и многие другие. Однако мы не обнаружили исследований, позволяющих реализовать и научно описать систему подготовки руководителей в сфере педагогики высшей военной школы.

В ВКА имени А. Ф. Можайского задачу подготовки военных специалистов в сфере педагогики высшей школы решает кафедра подготовки и повышения квалификации педагогических работников образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации. Она создана в соответствии с директивой начальника Генерального штаба ВС РФ от 16 мая 2005 года № 314/10/1438 и осуществляет подготовку военных специалистов в сфере педагогики высшей школы. За это время, в целом, создана система подготовки военных специалистов в сфере педагогики высшей военной школы, которая включает подготовку руководящего состава кафедр и научных подразделений, подготовку профессорско-преподавательского состава, подготовку начальников курсов и курсовых офицеров-преподавателей, подготовку прочих военных специалистов (начальники лабораторий, инженерно-технический состав кафедр и научных подразделений, специалисты учебно-методических отделов) (рис. 1).

Система подготовки руководящего состава кафедр и научных подразделений академии в настоящее время включает одну группу повышения квалификации начальников кафедр вузов Министерства обороны Российской Федерации и их заместителей и одну группу профессиональной переподготовки для замещения должностей начальников (заведующих) кафедр и их заместителей (рис. 2)



Рис. 1. Система подготовки военных специалистов

Первая группа – группа профессиональной переподготовки для замещения должностей начальников (заведующих) кафедр и их заместителей. Эта группа обучается по дополнительной профессиональной программе (ДПП) профессиональной переподготовки (ПП) военных специалистов для замещения должностей начальников (заведующих) кафедр и их заместителей, разработанной в соответствии с согласованными и утвержденными 22 апреля 2024 года квалификационными требованиями.

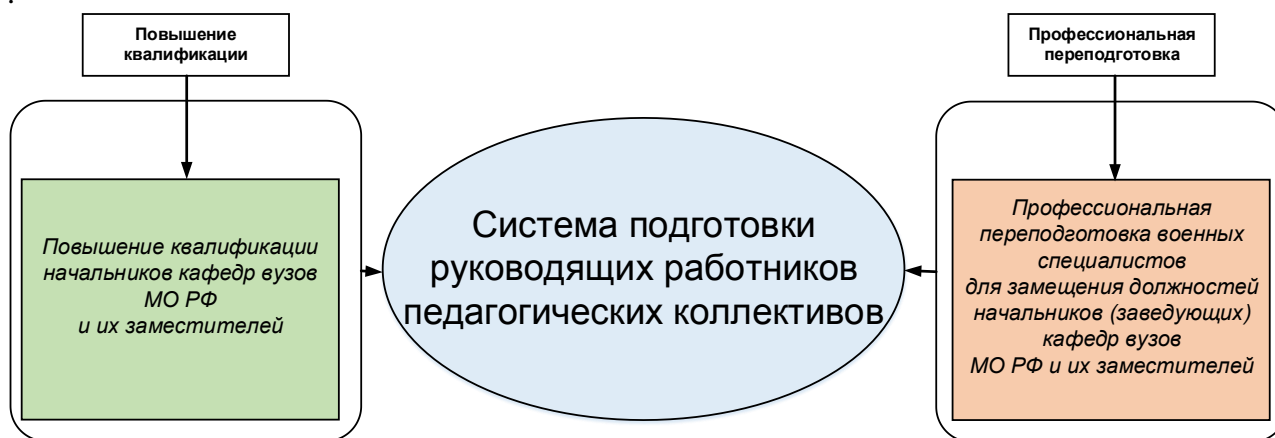


Рис. 2. Система подготовки руководящих работников педагогических коллективов вузов Минобороны России

Целью реализации ДПП ПП является формирование компетенций, необходимых для организации образовательной, методической и научной (научно-исследовательской) и других видов деятельности начальников (заведующих) кафедр и их заместителей. Группа изучает четыре учебные дисциплины (рис. 3):

- 1) нормативное правовое обеспечение образовательной деятельности кафедры (изучаются основные руководящие документы, регламентирующие образовательную деятельность военного вуза);
- 2) современные технологии планирования, организации и контроля образовательной, методической и научной (научно-исследовательской) деятельности на кафедре;
- 3) актуальные психолого-педагогические проблемы образовательной деятельности на кафедре;
- 4) электронные образовательные и информационные ресурсы.

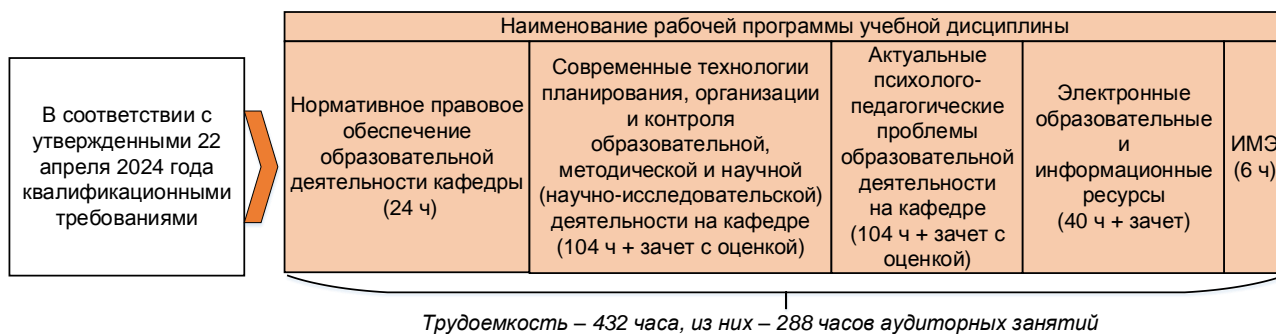


Рис. 3. Группа профессиональной переподготовки для замещения должностей начальников (заведующих) кафедр и их заместителей

Промежуточная аттестация предполагает три зачета и итоговый междисциплинарный экзамен. По дисциплине «Современные технологии планирования организации и контроля образовательной, методической и научной (научно-исследовательской) деятельности на кафедре» предусмотрена проектная работа, для которой на кафедре разработана частная методика по подготовке, написанию и защите проектной работы.

Вторая группа – группа повышения квалификации начальников кафедр вузов и их заместителей. На сегодняшний день обучение осуществляется по ДПП повышения квалификации (ПК) начальников кафедр образовательных организаций Министерства обороны Российской Федерации и их заместителей, разработанной в соответствии с согласованными и утвержденными 10 августа 2023 года квалификационными требованиями (рис. 4).

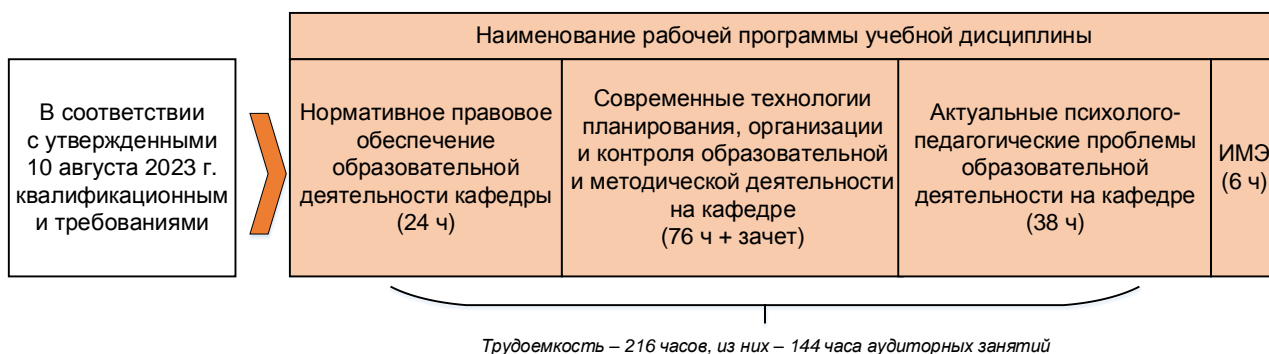


Рис. 4. Группа повышения квалификации начальников кафедр вузов и их заместителей

Целью реализации ДПП ПК является совершенствование управленческих и профессионально-педагогических компетенций, необходимых в деятельности начальников (заведующих) кафедр и их заместителей.

Подходы к формированию учебной программы группы такие же, как к формированию группы переподготовки. В группе также изучаются три дисциплины, но в меньшем объеме, чем в группе профессиональной переподготовки, изучение новых информационных образовательных ресурсов, в частности «Образование-МО», проводится по дисциплине «Современные технологии планирования, организации и контроля образовательной, методической и научной (научно-исследовательской) деятельности на кафедре». Предусмотрена проектная работа, для которой на кафедре разработана частная методика по подготовке, написанию и защите проектной работы.

Система подготовки руководящего состава научных (научно-исследовательских) организаций (подразделений) Министерства обороны Российской Федерации в настоящее время в академии представлена одной группой повышения квалификации руководящего состава научно-исследовательских подразделений вузов Министерства обороны Российской Федера-

ции и научно-исследовательских организаций Воздушно-космических сил. Подготовка группы организована на смежных кафедрах академии.

Целью реализации ДПП ПК является совершенствование компетенций, необходимых для повышения профессионального уровня в рамках имеющейся квалификации, обновление и получение дополнительных знаний, а также совершенствование практических навыков руководства научно-исследовательских подразделений вузов Министерства обороны Российской Федерации.

Сейчас обучение проводится по ДПП ПК руководящего состава научно-исследовательских подразделений вузов Министерства обороны Российской Федерации и научно-исследовательских организаций Воздушно-космических сил в соответствии с согласованными и утвержденными 22 августа 2020 года квалификационными требованиями. На кафедре предложен новый подход и разработаны квалификационные требования для подготовки группы на кафедре (рис. 5).



Рис. 5. Группа повышения квалификации руководящего состава научно-исследовательских подразделений вузов МО РФ и научно-исследовательских организаций Воздушно-космических сил

В данный момент обучение ведется по трем дисциплинам, но не затрагивает подготовку руководителей по управлению социально-психологическими процессами в подразделении, а также по организации, планированию и контролю ведения образовательной, методической деятельности и воспитательной работы на кафедрах вуза. Однако указанные компетенции необходимы руководящему составу научных подразделений (организаций) для самосовершенствования и актуальны при присвоении ученых званий.

Для оптимизации системы подготовки руководящих работников научных (научно-исследовательских) организаций на кафедре предложена организация подготовки группы профессиональной переподготовки военных специалистов для замещения должностей начальников управлений (отделов, лабораторий) вузов Минобороны России.

Целью реализации дополнительной профессиональной программы переподготовки является формирование компетенций, необходимых для организации повседневной деятельности начальников управлений, отделов, лабораторий.

Таким образом, предлагается система подготовки руководящих работников научных (научно-исследовательских) организаций, представленная в виде схемы на рис. 6.



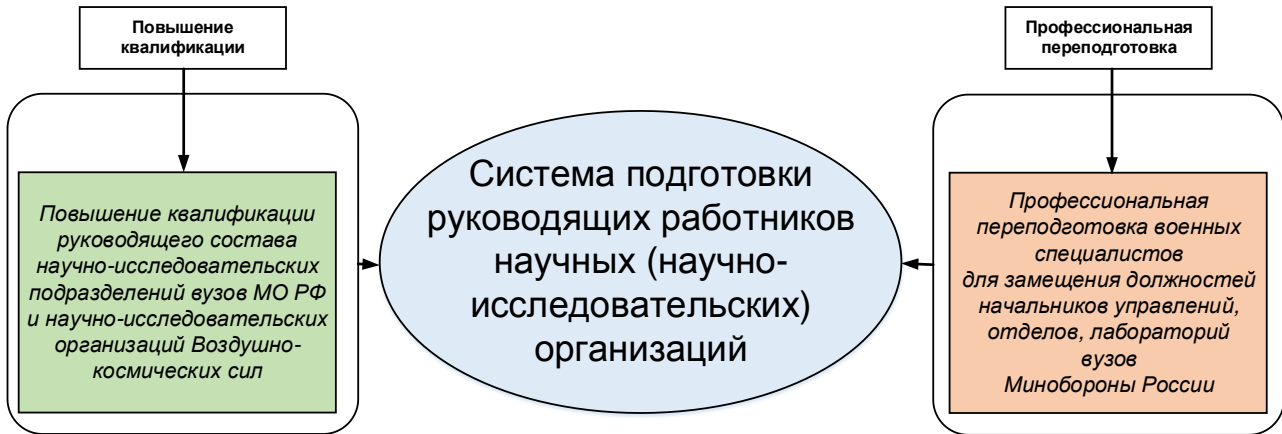


Рис. 6. Система подготовки руководящих работников научных (научно-исследовательских) организаций Минобороны России

Кафедрой предложена дополнительная профессиональная программа повышения квалификации группы начальников факультетов вузов Минобороны России. С учетом огромной загруженности данной категории обучающихся подготовка может проводиться дистанционно. Предложены три учебные дисциплины трудоемкостью в 48 часов (рис. 7).

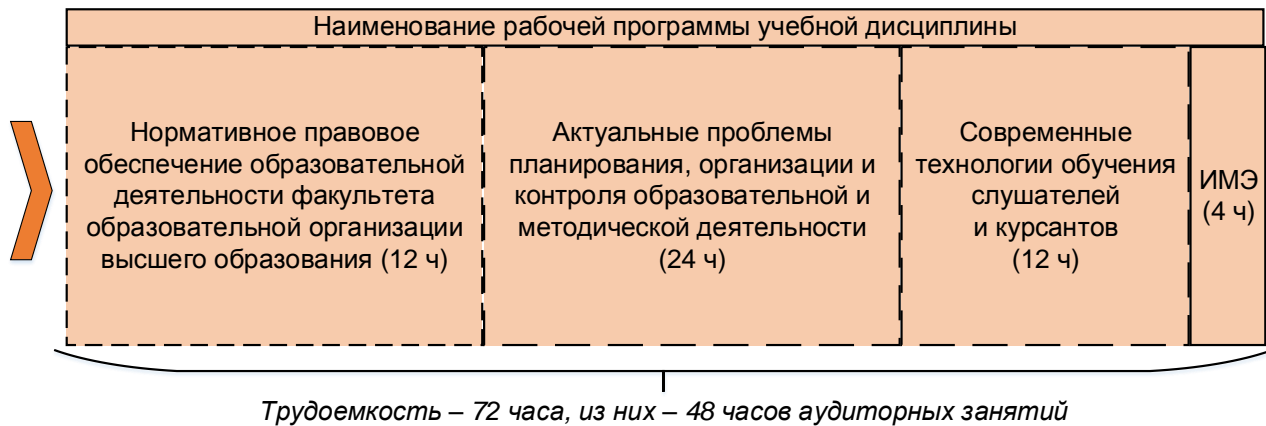


Рис. 7. Предложение по группе подготовки начальников факультетов

Целью реализации ДПП ПК является совершенствование компетенций, необходимых для повышения профессионального уровня в рамках имеющейся квалификации, обновление и получение дополнительных знаний, а также совершенствование практических навыков руководства факультетом.

Таким образом, систему подготовки руководящего состава можно представить в виде схемы, показанной на рис. 8.

Предложенная система подготовки руководящего состава в группах переподготовки и повышения квалификации сформирована на кафедре и апробирована на I Межведомственной научно-практической конференции «Военное образование в системе обеспечения национальной безопасности в России», проведенной в Военном университете имени князя Александра Невского, и на круглом столе, посвященном «актуальным проблемам подготовки военных специалистов в современных условиях», проведенном в ВКА имени А. Ф. Можайского.

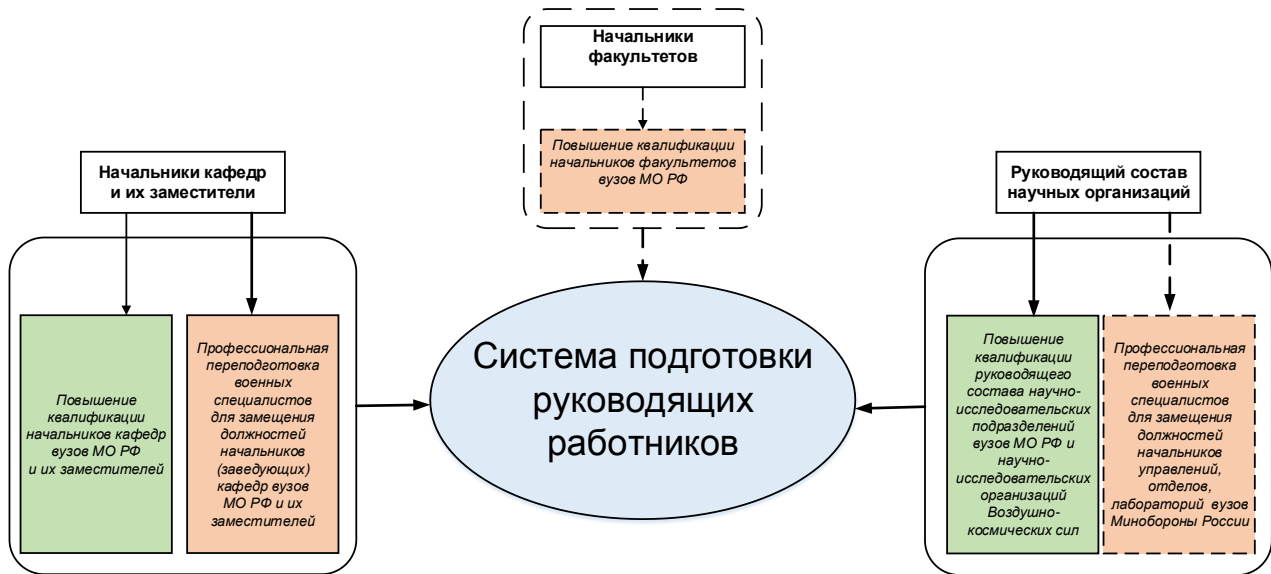


Рис. 8. Система подготовки руководящих работников вузов Минобороны России

#### Список используемых источников

1. Исследование гуманитарных систем / под ред. В. П. Бедерхановой, сост. А. А. Остапенко. – Краснодар : Парабеллум, 2013. – Вып. 1 : Теория педагогической системы Н. В. Кузьминой: генезис и следствия. – 90 с.
2. Вековцева Т. А. Система содействия профессиональному саморазвитию преподавателя вуза // Научно-педагогическое обозрение. – 2014. – С. 4–15.
3. Барабаничиков А. В., Муцынов С. С. Педагогическая культура преподавателя высшей военной школы. – М., 1985. – 169 с.
4. Управление кафедрой : учебник / под ред. С. Д. Резника. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 339 с.
5. Управление факультетом : учебник / под ред. С. Д. Резника. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 695 с.

В. П. Огородников,  
*доктор философских наук, профессор*

## **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЛОСОФСКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВАНИЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**

Раскрываются философско-методологические основания кризиса физики конца XIX – середины XX веков и сегодняшние проблемы интерпретации фактов квантовой механики. Наибольшее внимание уделяется анализу взглядов основоположника квантовой механики В. Гейзенберга. Доказывается, что все затруднения в развитии квантовой теории имеют своим основанием метафизическую (антидиалектическую) и идеалистическую философскую методологию. В частности, показывается отрицательная роль лапласовского детерминизма и индетерминизма, отождествления концептуальных схем с объективной реальностью, использование логичности построения теории как критерия ее истинности. Вскрывая методологические ошибки специалистов в области квантовой механики, автор на основании диалектико-материалистической методологии предлагает варианты решения парадоксов этой перспективной области научного познания.

Ключевые слова: квантовая теория, методология, копенгагенская концепция, волновая функция, принцип неопределенности, логичность и истинность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Открытие в 1897 году Джозефом Томсоном (1856–1940) электрона стало началом интенсивного исследования микромира и становления неклассической науки. Сам Томсон и выдающиеся физики конца XIX – первой половины XX веков – Э. Мах, А. Пуанкаре, Э. Резерфорд, М. Планк, А. Эйнштейн, Э. Шредингер, Л. де Бройль, П. Дирак, Н. Бор, В. Паули, В. Гейзенберг, М. Борн (все – лауреаты Нобелевской премии по физике) – явились разработчиками принципиально новой теории микромира, обосновали теорию относительности, основы ядерной физики, стояли у истоков квантовой теории и теории относительности. При этом абсолютное большинство названных физиков использовали в интерпретации своих открытий и математических построений старую философскую методологию классической физики.

Главные постулаты указанной методологии: 1) отождествление материи с веществом; 2) лапласовский детерминизм, отрицающий объективную случайность; 3) неразличение концептуального, концептуального и объективно-реального; 4) гипостазирование – приписывание статуса объективно-реального существования математическим конструктам, концептуальным схемам и терминам; 5) объявление логичности критерием истинности суждений и теорий. Именно эти методологические основания привели к кризису и неклассическую физику на рубеже XIX–XX веков и постнеклассическую науку середины XX – начала XXI веков, связанную прежде всего с разработкой квантовой механики. Сегодняшние специалисты в области квантовой механики вновь сталкиваются с теми же проблемами этой фундаментальной теории, что и основатели квантовой механики. Современные физики продолжают использовать при этом названные выше философско-методологические основания, что не только не позволяет найти решения старым парадоксам квантовой физики, но и приводит многих специалистов к мистическим и идеалистическим интерпретациям квантовой теории. Все это сдерживает развитие данной теории, составляющей, без преувеличения, главное научное основание формирующегося в наше время информационного общества.

Сказанное определяет актуальность предпринятого в данной работе переосмысления основных положений квантовой физики с помощью мировоззренческо-методологических постулатов диалектики и материализма.

## МЕТАФИЗИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛИЗМ КАК МЕТОДОЛОГИЯ ПОЗНАНИЯ

Еще в 1886 году Ф. Энгельс записал то, что должен иметь в виду каждый представитель науки и сегодня: «С каждым составляющим эпоху открытием, даже в естественно-исторической области, материализм неизбежно должен изменять свою форму» [1, с. 286]. Этого не учли ни представители неклассической науки рубежа XIX – XX веков, ни, как будет показано ниже, выдающиеся физики начала XX века – творцы квантово-механической теории.

Не менее убедительно В. И. Ленин в своей главной философской работе «Материализм и эмпириокритицизм» (1909) доказал, что кризис физики указанного периода имеет философское основание – метафизический (антидиалектический) материализм, не применимый для интерпретации открытий микромира. Попытки его использования приводят даже выдающихся ученых к тупиковым идеалистическим выводам. В. И. Ленин отмечает: «Современная физика лежит в родах. Она рождает диалектический материализм» [2, с. 333].

Приведенный ниже анализ показывает, что «роды» продолжают. Современная постнеклассическая наука и прежде всего квантовая механика все еще продолжают везде пользоваться старым метафизическим материализмом. В результате, пытаясь использовать эту методологию как основание интерпретации новых фактов, ученые приходят к идеалистическим выводам.

Для того чтобы выяснить основания кризисных явлений в квантово-механической теории, необходимо обратиться к основным работам отцов-основателей квантовой механики – лауреата Нобелевской премии В. Гейзенберга (1901–1976) и лауреата Нобелевской премии Э. Шредингера (1887–1961). Их анализ вполне актуален, так как за истекшие с момента написания этих работ полвека в квантовой механике появились лишь дополнительные толкования сущности квантово-механических процессов, в которых отсутствует принципиальная новизна. Эти интерпретации не только не разрешают тех парадоксов теории, с которыми столкнулись классики, но еще более уходят от материалистического и диалектического понимания новых фактов.

Начиная свою книгу «Физика и философия» (1959), В. Гейзенберг отмечает, что в интерпретации новых фактов науки огромную роль играют те философские взгляды, которых придерживаются специалисты в той или иной области научного познания. При этом для физики XX века наибольшее значение имеют такие философские понятия, как «время», «пространство» и «реальность». Именно они становятся тем методологическим инструментарием, который использует современная ядерная физика [3, с. 7, 8].

Наиболее ярким проявлением роли методологии в интерпретации научных фактов стало открытие (1900) М. Планком того, что энергия может испускаться и поглощаться лишь дискретными квантами энергии. Так были заложены основы квантовой теории. Вместе с тем идея, что свет распространяется квантами, выходила за рамки классической физики, за пределы метафизического материализма, который выступал до тех пор в качестве мировоззрения и как методология всей классической науки.

Квантовая теория опровергала и попытки интерпретировать микромир как уменьшенный макромир. В частности, оказалась несостоятельной «планетарная» модель атома, выдвинутая «отцом» ядерной физики Э. Резерфордом (1871–1937). Такая модель (1911), в которой вокруг ядра атома по разным круговым орбитам движутся электроны, по сей день не только украшает обложки многих книг и изданий по физике и химии, но часто используется для объяснения различных взаимодействий и превращений в микромире.

Однако модель Резерфорда не объясняла многие процессы, происходящие с микрочастицами и их потоками. Тогда лауреат Нобелевской премии по физике Луи де Бройль (1892–1987) выдвинул гипотезу корпускулярно-волнового дуализма, постулирующую положение, что микроскопические объекты (любые микрочастицы) при одних условиях ведут себя как

волны, а при других – как корпускулы (частицы). Эта гипотеза получила множество экспериментальных подтверждений, но оставляла и множество вопросов о двойственности объективной реальности. Появилась проблема «интерпретации интерпретации», т. е. выяснения связи с объективной реальностью самого корпускулярно-волнового дуализма.

Максимальное внимание так называемой «копенгагенской» интерпретации корпускулярно-волнового дуализма уделил В. Гейзенберг. С его точки зрения эта интерпретация не только наиболее адекватно раскрывает сущность дуализма волна-частица, но и помогает понять открытый В. Гейзенбергом в 1927 году принцип неопределенности. Согласно этому принципу, невозможно одновременно точно определить координаты и импульс движущегося в атоме электрона в силу его волновых свойств.

Копенгагенская интерпретация была предложена датским физиком-теоретиком, лауреатом Нобелевской премии, Н. Бором (1885 – 1962). Он заявил (1927), что для полного описания любого квантово-механического объекта следует применять два взаимоисключающих («дополнительных») набора классических понятий, совокупность которых дает исчерпывающую информацию об этих явлениях как целостных. Каноны классической физики были, таким образом, частично реабилитированы.

Копенгагенская интерпретация была принята В. Гейзенбергом еще и потому, что он оставался в главных своих воззрениях на позициях философского материализма. В то же время Гейзенберг пишет, что эта интерпретация исходит из двух противоречащих друг другу положений. С одной стороны, все эксперименты в квантовой области необходимо описывать в понятиях классической физики, но с другой – эти понятия не точно соответствуют объективной реальности. Именно это противоречие определяет статистический характер квантовой физики. Подтверждая свои материалистические воззрения, Гейзенберг заявляет, что квантовая теория не несет в себе никаких субъективных оснований и не включает в атомные взаимодействия сознание физика [3, с. 26].

Вместе с тем сегодня многие популяризаторы и даже специалисты пытаются оценить корпускулярно-волновой дуализм и принцип неопределенности Гейзенберга как аргумент в пользу мнения, что квантовая механика не имеет дело с объективной реальностью. Таким заключениям не в малой степени способствует то, что материализм В. Гейзенберга носит явно метафизический характер. Физик постоянно «разводит» вероятностные отношения и причинную детерминацию, утверждая, что пространственно-временное описание атомных процессов является дополнением к их каузальному или детерминистскому описанию [3, с. 22].

Оппонируя ученому, заметим, что пространственно-временное описание есть главная характеристика любого процесса, которая для всякой науки (и естественной, и общественной) должна включать и указание на причину процесса. Ошибка Гейзенберга и многих его последователей состоит в том, что они под детерминизмом понимают одно-однозначную необходимую причинную связь. Случайность при этом отделяется от необходимости и объявляется чем-то недетерминированным или тем, причины чего не познаны. Кроме того, большинство физиков не различают причинных и не причинных детерминаций (кондициональной, функциональной).

Опираясь на данные воззрения, Гейзенберг заявляет, что функция вероятности объединяет объективные и субъективные элементы. Этот тезис он аргументирует тем, что функция вероятности содержит утверждения относительности нашего знания системы. Для отдельных исследователей (наблюдателей) это знание различно, а следовательно, субъективно. Такой взгляд возвращает нас к Демокриту и Лапласу, которые считали, что в мире действует лишь абсолютная необходимость причинно-следственного ряда, а случайность представляет уровень незнания переплетения причинных цепей [4, с. 8, 9].

С точки зрения диалектического детерминизма, случайность является формой бытия необходимости. Эта диалектика проявляется в законе единства количественной и качественной определенности. Единство представлено мерой – множеством количественных характеристик, внутри которого существует данное качество как вероятностная необходимость. Ме-

ра показывает и вероятностное распределение, и «редукцию» вероятностного в динамическое. Она же представляет единство причины и непринципиальных детерминаций (условий, инспирирующей, функциональной и тому подобных) [5, с. 29–31, 80–85]. Такая взаимосвязь существует и в мега-, и в макро-, и в микромире. Так, например, величины окружающей температуры, влажности, освещенности – условия для роста растения, которые могут меняться (случайность – форма бытия необходимости) в пределах количественной меры.

С другой стороны, в квантовой механике и принцип неопределенности, и корпускулярно-волновой дуализм не оставляют, казалось бы, никакой надежды на точные предсказания в изменении квантово-механических процессов.

В квантовой физике вводится комплекснозначная функция  $\Psi$   $\{\displaystyle \Psi\}$ , описывающая «чистое» состояние объекта, которая называется волновой функцией. Волновая функция (суперпозиция) содержит в себе все возможные будущие состояния квантово-механической системы. Но с ее помощью нельзя предсказать, какая именно возможность реализуется, станет действительностью. Степень знания является обратной величиной вероятности прогнозирования. Это всё время проявляется и в познании макромира. Интересно, что тут действует диалектический закон связи количества и качества.

В то же время, возражая некоторым своим коллегам (прежде всего Э. Шредингеру) Гейзенберг высказывается в пользу материалистического истолкования функции вероятности и роли наблюдения в редукции волновой функции. Наблюдение, с его точки зрения, не детерминирует реализацию какой-либо возможности (как до сих пор считают многие специалисты и популяризаторы квантовой механики). Наблюдение только находит из всех возможных событий то, которое фактически совершилось [3, с. 25].

К сказанному нужно добавить, что вероятность отношения состояний объективна и она не может быть аргументом к утверждению, что попадания волны или частицы на определенную область пластинки (в известном эксперименте со щелями) зависит от того, наблюдаем ли мы за этим процессом или нет. От последнего зависит не объективная вероятность процесса, а наша субъективная интерпретация этого процесса.

## **ИДЕАЛИЗМ В ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Следует отметить, что полностью объективным не может быть никакое ОПИСАНИЕ, даже описание процессов макромира в классической физике и во всей классической науке. Мало того, с учетом объективности случайности, как формы бытия необходимости (закона), всякое описание и предсказание в классической науке носят вероятностный характер. И во все не из-за того, что мы не знаем всех «истинных причин», а потому, что всякий объективный процесс не является абсолютно необходимым и в принципе носит вероятностный характер.

Парадоксально, что Гейзенберг после приведенных выше суждений об объективности атомных процессов допускает субъективно-идеалистическую интерпретацию результатов исследования этих процессов. Он утверждает, что то, что наблюдается в исследовании квантовых взаимодействий – не подлинная природа, а та видимость, которая зависит от способа постановки вопросов к исследуемому процессу [3, с. 27].

Рассматривая философско-мировоззренческие основания квантовой механики, В. Гейзенберг прямо заявляет, что современная атомная физика столкнула естествознание с материалистического пути, на котором оно стояло в XIX веке [3, с. 28].

По мнению автора, уход естествознания с материалистических оснований проявился и в квантово-механических парадоксах и во всех идеалистических интерпретациях этих парадоксов – в абсолютизации роли наблюдателя в редукции волновой функции, многомировой концепции, концепции самосознающей Вселенной.

Особняком стоит предложенная в 1986 году Дж. Крамером транзакционная интерпретация [8]. Последняя претендует на преодоление именно субъективизма копенгагенской интерпретации – зависимости реальности от наблюдателя. Однако преодоление осуществляется за счет введения положения об онтологическом приоритете событий в псевдвремени, что, с одной стороны, является возвращением к субстанциональной концепции пространства-времени, а с другой – транзакция трактуется как то, что происходит в поле возможного, а не действительного.

Как уже отмечалось, под влияние субъективного идеализма часто попадает и В. Гейзенберг. Так, симпатизируя Пифагору (570–490 г. до н. э.), считавшему, что мир представляет собой различные сочетания математических (геометрических) форм, Гейзенберг утверждает, что элементарные частицы также, в сущности, математические формы [3, с. 36]. То есть материя опять исчезает, остаются одни уравнения, как заявлял еще 1905 году А. Пуанкаре? При этом Гейзенберг указывает, что в современной физике природные взаимодействия можно описать при помощи достаточно простых математических законов. Это доказывает, что ученые имеют дело не с изобретениями собственного ума, а именно с объективной реальностью [3, с. 44]. Однако получается, что критерием существования материального является идеальное – математические формулы.

Заметим, что с позиций подлинного материализма всё как раз происходит с «точностью до наоборот». В том, что мы всё свое существование имеем дело с объективным миром, убеждает и наш повседневный опыт – стоит нам неадекватно отразить объективный мир, как мы не справляемся уже с элементарными задачами по его преобразованию, не можем, например, свалить огромное живое дерево, просто колотя по нему тросточкой. То, что при всех парадоксах теории квантового мира мы успешно используем открытия в этом мире для целесообразного преобразования макромира, создания электронных машин, материалов с заданными свойствами, освоении Земли и Космоса – это аргументы и в пользу существования объективно реального мира и в пользу возможности его адекватного отражения сознанием – истинного познания.

Специальная теория относительности (СТО) А. Эйнштейна явилась концепцией, резко ограничившей область применения классической физики и знаменовавшей начало всей неклассической науки. Прежде всего, СТО доказала, что пространство и время не являются самостоятельными субстанциями, нет демокрито-ньютонического абсолютного бесконечного пространства и абсолютного вечного времени. Пространство и время являются всеобщими и необходимыми характеристиками – атрибутами объективной реальности, материи. Надо отметить, что это показал еще Аристотель [6, с. 118, 307].

Однако квантовая механика, постулировав корпускулярно-волновой дуализм, не только разорвала пространство и время, но поставила состояние квантового объекта в зависимость от времени. Так, уравнение Шредингера описывает, как волновая функция меняется со временем.

Гейзенберг отмечает, что в общей теории относительности (ОТО) геометрия и материя взаимно обуславливают друг друга [3, с. 33]. Но такая симметричная взаимодетерминация материи и ее атрибута вступает в явное противоречие с СТО и вновь открывает вопрос о наличии пустого пространства.

Опираясь на постулаты ОТО, Гейзенберг заявляет, что электромагнитные процессы и механические движения являются свойствами пустого пространства. Это, по его мнению, доказывается, например, фактом существования центробежной силы [3, с. 71].

Здесь выдающийся физик ставит, как представляется, все с ног на голову. Центробежная сила (как и центростремительная) действует на материальные объекты и процессы, что отражается в их пространственных характеристиках. Но на «пустое пространство» и в пустом пространстве никакие силы не действуют. Как можно представить закручивающееся пустое абсолютное и бесконечное пространство? Что, собственно, закручивается – пустота?

Вместе с тем Гейзенберг сам же и опровергает сделанное им предположение. Он указывает, что силы тяготения вызываються массами. Поэтому центробежные силы в некоторой вращающейся системе отсчета должны вызываться вращением относительно этой системы весьма удаленных масс Вселенной [3, с.73]. Таким образом, центробежная сила возникает не в пустоте, из ничего, а вызывается вращением вполне материальных (и с большой массой) тел. Следовательно, тяготение не является свойством «пустого» пространства.

Рассматривая острую для квантовой механики проблему наблюдения и измерения, Гейзенберг говорит, что наблюдатель выполняет скорее функции регистрирующего устройства. При этом он утверждает, что процедура регистрации квантово-механического события реализует редукцию волновой функции, осуществляет переход возможности в действительность. Наблюдатель не может быть исключен из интерпретации этого события, так как он и вызывает это событие [3, с.83].

Возникает вопрос: а может ли человек стать наблюдателем квантово-механического взаимодействия без прибора, без регистрирующего устройства? Очевидно, что нет! Следовательно, процесс редукции волновой функции происходит во взаимодействии с прибором, а не с человеком непосредственно.

Поэтому результат, то есть реализация чего-то одного из «пакета» возможностей – новая действительность, определяется свойствами используемого регистрирующего прибора, но не свойствами самого наблюдателя.

Рассмотрим пример с потоком электронов, вылетающим из электронной пушки электронно-лучевого кинескопа. Если этот поток проходит через (или отражается от) дифракционную решетку, получается соответствующая волновая дифракционная картина на экране (фотопластинке). А если поток электронов, вылетающих из электронной пушки электронно-лучевого кинескопа, проходит через магнитные фокусирующие устройства, то он падает на экран как поток частиц, выбивающих из люминесцентного слоя экрана фотоны, что и создает достаточно четкую картинку на экране монитора (телевизора). Все эти процессы не требуют присутствия наблюдателя, но зависят от свойств используемого устройства.

Гейзенберг полагал, что советские академики Д. И. Блохинцев (1908–1979) и А. П. Александров (1903–1994) потому критиковали копенгагенскую интерпретацию корпускулярно-волнового дуализма, что были «в плену» диалектико-материалистической философии. Он пишет: «...нельзя ожидать, что мыслители, создавшие диалектический материализм более ста лет назад, могли предвидеть развитие квантовой теории. Их представления о материи и реальности не могут быть приспособлены к результатам нашей сегодняшней утонченной экспериментальной техники» [3, с. 84]. Эта мысль ученого вполне аналогична весьма распространенному сегодня утверждению, что теория марксизма устарела, потому что ей более 150 лет... В обоих случаях допускается классическая логическая ошибка «не вытекает, не следует» (лат. *non sequitur*) в доказательстве некоторого тезиса, заключающаяся в том, что между аргументами доказательства и его тезисом отсутствует логическая связь, вследствие чего аргументы (даже если они истинны) не обосновывают истинности доказываемого тезиса.

Приведем контраргумент: те, кто считает, что диалектико-материалистическая философия не действенна, потому что ей 150 лет и после этого много было открыто наукой такого, о чем и подумать не могли классики марксизма, в то же время признают действенность и актуальность религиозных учений. А ведь христианскому мировоззрению уже больше 2000 лет...

Гейзенберг считал, что ученый никогда не должен полагаться на какое-то единственное учение, никогда не должен ограничивать методы своего мышления одной-единственной философией [3, с. 84–85]. Но если применяемые методы противоположны по своей сущности, то такой ученый, используя их одновременно, все время будет нарушать закон исключенного третьего. Кроме того, нельзя забывать, что требование истинности относится и к применяемым методам. Метод, который не адекватен исследуемым процессам, – не истинен. Применение такого метода в исследовании и интерпретации фактов либо не даст никакого желае-



мого результата, либо приведет ученого к абсурдным выводам и заблуждениям. Таковы, например, «концепции» теплорода, «астрального плана», «тонких полей», «энергии ауры», «торсионных полей», «биополей» и тому подобные. На практике применение неистинных методов может привести и к трагическим последствиям. Так в медицине на протяжении нескольких столетий применялся для лечения практически всех заболеваний метод кровопускания, освобождения от «дурной крови». Отсутствие точных статистических данных об эффективности этого метода не оставляет сомнений в смертельной опасности его применения.

В то же время использование идеалистического мировоззрения и методологии в научной практике всегда вело и ведет научные исследования в тупик. Рассмотренные выше основания кризиса неклассической и постнеклассической науки XX – начала XXI веков убеждает в истинности этого тезиса. Сегодня приходится сталкиваться с удивительными по своей антинаучной сущности интерпретациями квантово-механической теории.

Такой является, например, совершенно мистическая концепция параллельного существования многих материальных миров в «многомировой» концепции американского физика Хью Эверетта (1930–1982). Эверетт математически верно отстаивал мнение, что вселенское состояние является квантовой суперпозицией нескольких (а возможно, и бесконечного числа) состояний одинаковых и не взаимодействующих между собой параллельных вселенных (1957) [10]. Эта концептуальная схема исходит из первичности акта наблюдения по отношению к его результату. Концептуальная схема выдается за возможную реальность благодаря тому, что логичность принимается за критерий истинности.

Еще одной современной субъективно-идеалистической интерпретацией квантово-механических парадоксов является концепция американского физика индийского происхождения Амита Госвами (г. р. 1936). Уже название его книги «Самосознающая вселенная. Как сознание создает материальный мир» представляет автора как убежденного субъективного идеалиста. Госвами уверен, что все парадоксы квантовой механики и любой современной науки или науки древности легко разрешаются, если предположить, что Вселенная состоит не из материи, а из сознания [7, с. 16].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работ ведущих специалистов в области квантовой механики показывает, что основные парадоксы квантовой теории не имеют объективного основания. Они базируются на постулатах метафизического материализма и идеализма. Поэтому разрешение парадоксов определяется переходом на позиции философии диалектического материализма, связанные:

1) с рассмотрением материи как саморазвивающейся объективной реальности и отказом от отождествления материи с веществом;

2) с концепцией диалектического детерминизма, раскрывающей диалектическую связь причины и непринципиальных детерминаций в переходе возможности в действительность. Такая парадигма обосновывает неразрывность вероятностной необходимости, заключенной в конкретной количественной мере бытия качества, и случайности как формы проявления необходимости;

3) с пониманием объективной диалектической связи пространства и времени как атрибутов материи, которые не могут существовать как абсолютно самостоятельные субстанции;

4) с признанием общественной практики, во всем многообразии ее форм, фундаментальным критерием истинности суждений и концепций. При этом логичность признается критерием правильности определения понятий; построения суждений, умозаключений, доказательства и опровержения;

5) со строгим различием перцептуального, концептуального и объективно-реального.

**Список используемых источников**

1. *Энгельс Ф.* Диалектика природы // Маркс К. и Энгельс Ф. Сочинения : в 50 т. – Т. 21. – М. : Госполитиздат, 1961. – 827 с.
2. *Ленин В. И.* Материализм и эмпириокритицизм // Полн. собр. соч. : в 55 т. – Изд. 5-е. – М. : Изд-во полит. литературы, 1968. – Т. 18. – 525 с.
3. *Гейзенберг В.* Физика и философия. Часть и целое : пер. с нем. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 400 с.
4. *Лаплас П.-С.* Опыт философии теории вероятностей. – М. : Книжный дом «Либроком», 2011. – 208 с.
5. *Огородников В. П.* Познание необходимости : Детерминизм как принцип научного мировоззрения. – М. : Мысль, 1985. – 206 с.
6. *Аристотель* Метафизика // Соч. : в 4 т. – М. : Мысль, 1975. – Т. 1. – 550 с.
7. *Госвами А.* Самосознающая вселенная. Как сознание создает материальный мир. – М. : Открытый мир, Ганга, 2008. – 448 с.
8. Transactional Interpretation of Quantum Mechanics // Compendium of Quantum Physics. / J. Cramer [et al.]. – Springer, July 2009. – P. 795–798. – DOI: 10.1007/978-3-540-70626-7\_223.
9. *Everett Hugh* Relative State Formulation of Quantum Mechanics (PDF) // Reviews of Modern Physics. – № 29 (3). – P. 454–462. – DOI: 10.1103/RevModPhys.29.454.

Е. В. Черняев<sup>1</sup>,

*кандидат экономических наук*

<sup>1</sup>Вольский военный институт материального обеспечения, г. Вольск.

## **К ВОПРОСУ О СОСТОЯНИИ И ТЕНДЕНЦИЯХ РАЗВИТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

В современных геополитических условиях ракетно-космическая деятельность является актуальной во всех сферах существования. При этом мировые тенденции ее развития создают, с одной стороны, преференции для продвижения российской продукции на мировой рынок, с другой стороны, ограничивают ее развитие в условиях наложения санкций, что требует адекватного ответа от ракетно-космической отрасли как в экономическом, так и в технологическом плане. В заключение исследования автор выявляет прогнозные тенденции дальнейшего развития ракетно-космической деятельности в России.

Ключевые слова: ракетно-космическая деятельность, запуски ракет-носителей, SWOT-анализ, тенденции развития, космодромы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В современной России в условиях санкционного давления стран Запада и трансформации миропорядка, сопровождающихся перестройкой глобальных финансовых, логистических и производственных систем, вопросы научно-технологического развития (НТР) государства являются особенно актуальными.

Ракетно-космический комплекс (РКК) Российской Федерации представляет собой одну из ключевых отраслей национальной промышленности, играющую стратегическую роль в обеспечении национальной безопасности, научного прогресса и технологического суверенитета (лидерства) страны. С момента своего становления РКК России был неотъемлемой частью мировой космической отрасли, что позволило стране занять лидирующие позиции в исследованиях и освоении космоса. Тем не менее, в последние десятилетия российский ракетно-космический комплекс сталкивается с серьезными проблемами и вызовами, связанными с санкционной политикой ряда государств, устареванием материально-технической базы, утратой некоторых компетенций, а также с нехваткой высококвалифицированных кадров, усилением конкуренции со стороны других космических держав и частных компаний. При этом освоение космического пространства в современных геополитических условиях представляет собой стратегически важное направление обеспечения государственной независимости, национальной безопасности, а также осуществления инновационного и технологического развития страны в целом.

Достижения Российской Федерации в сфере ракетно-космической деятельности за более чем 60-летнюю историю освоения космического пространства позволяют решить ряд экономических, социальных, гражданских и оборонных задач, направленных на формирование и поддержание автономного векторного развития государства.

Определение экономического состояния и конкурентоспособности российского ракетно-космического комплекса (РКК) на мировом рынке в последнее время приобретает особую актуальность и требует более тщательного аналитического подхода для выявления ключевых тенденций развития, сильных и слабых сторон отрасли, благоприятных и неблагоприятных факторов развития, а также для определения потенциально эффективных решений имеющихся проблем.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РФ И ЕЕ ОСНОВНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ

В современных условиях основные отечественные направления по освоению космического пространства находят отражение в Федеральной космической программе России на 2016–2025 годы (ФКП-2025), федеральной целевой программе «Развитие космодромонов на период 2017–2026 годов в обеспечение космической деятельности РФ».

Указанные документы являются своеобразным логическим продолжением и раскрытием Основ государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 года.

Нормативно-правовая основа, регламентирующая содержание ракетно-космической деятельности в России, и ее основные аспекты представлены законами, актами Правительства РФ, локальными актами Госкорпорации «Роскосмос» и другими документами.

В табл. 1 приведена сводная информация ключевых нормативно-правовых документов, регламентирующих космическую деятельность.

Таблица 1

### Нормативно-правовая база в сфере ракетно-космической деятельности РФ

Принадлежность нормативно-правового акта	Вид и наименование нормативно-правового акта
Законы РФ	Закон Российской Федерации от 20 августа 1993 г. № 5663-1 «О космической деятельности»; федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 215-ФЗ «О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос»; федеральный закон от 13 июля 2017 г. № 46-ФЗ «О внесении изменений в закон Российской Федерации «О космической деятельности»; федеральный закон Российской Федерации от 04 мая 2011 г. № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности»
Подзаконные акты Правительства РФ	Постановление Правительства РФ от 07.07.2015 № 682 «О полномочиях федеральных органов исполнительной власти в области использования результатов космической деятельности»; распоряжение Правительства РФ от 31.05.2022 № 1374-р. Утвержден план мероприятий на 2022–2025 годы по реализации Основ государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 года; Основы государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 года; Типовое положение «О полномочиях и функциях центров компетенций в сфере использования результатов космической деятельности» (федерального, регионального, муниципального уровней)
Локальные акты Госкорпорации «Роскосмос»	Приказ государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» от 16.08.2019 № 259 «О создании Межведомственной комиссии по использованию результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития Российской Федерации и ее регионов»; приказ Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» от 27.12.2016 № 294 «О мерах по обеспечению координации работ по реализации государственной политики в области использования результатов космической деятельности»

По состоянию на 2024 год в глобальном плане ракетно-космическая деятельность находится на высоком уровне технологической, производственной, экономической интенсифика-

ции, что связано как с увеличением спроса на ее результаты, обусловленном популяризацией данной сферы, так и с возможностями совершенствования материальной части.

С использованием материалов [1], а также на основании собственных исследований автором сформулированы ключевые индикаторы производственно-экономического развития ракетно-космической отрасли России, характеризующие его векторные направления.

### 1. Объем финансирования ракетно-космической деятельности.

Участие государств в космических программах является высокотехнологичным направлением и всегда сопряжено с большими финансовыми затратами.

В проекте федерального бюджета на 2024–2026 годы на государственную программу «Космическая деятельность России» было заложено 815,96 млрд. руб. (рис. 1), с максимальными бюджетными ассигнованиями в 2024 году и их последующим снижением к 2026-му.

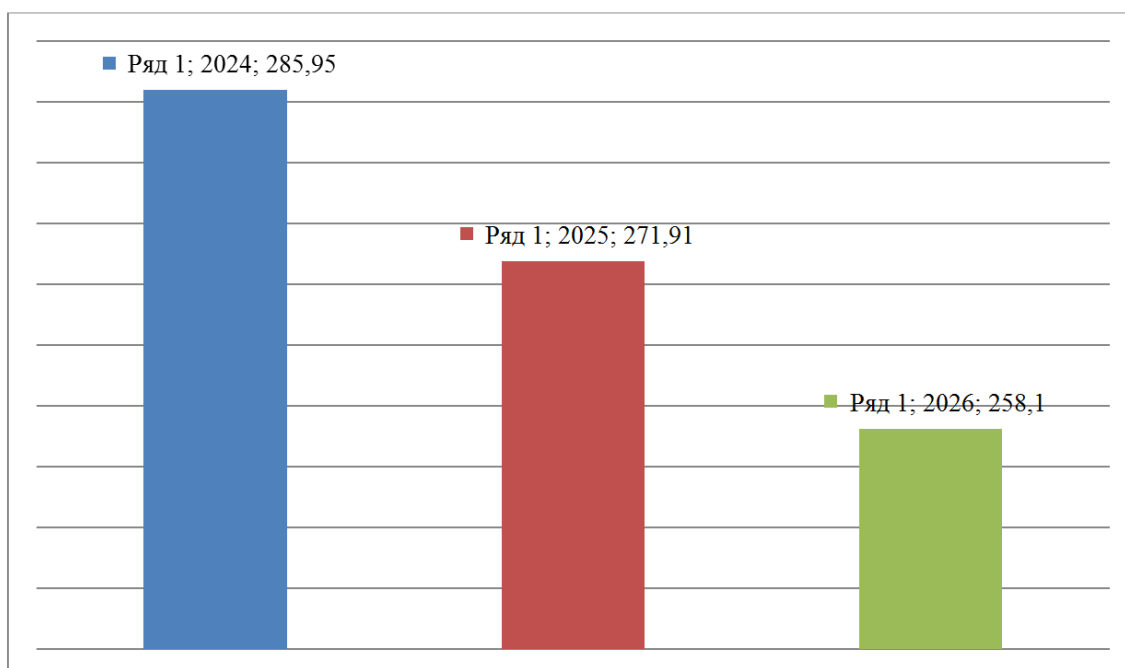


Рис. 1. Расходы федерального бюджета на государственную программу «Космическая деятельность России» на 2024–2026 годы, млрд. руб.

Финансирование российской ракетно-космической деятельности в международном рейтинге бюджетного финансирования занимает пятое место после бюджетов NASA (США), ESA (Европа), CNSA (Китай), JAXA (Япония), что свидетельствует о недостаточности имеющихся финансовых показателей инвестирования для опережающего развития отечественной отрасли. В этой связи с учетом современных геополитических условий, в которых находится Российская Федерация, соответствующие меры представляется полезным предусмотреть в ходе разработки национального проекта «Развитие космической деятельности РФ на период до 2030 года и перспективу до 2036 года».

### 2. Объем коммерческого рынка космической деятельности.

На сегодняшний день доля российского сектора ракетно-космической деятельности на мировом коммерческом рынке составляет примерно 1% [1].

Недостаточная развитость компаний коммерческого блока ракетно-космического комплекса препятствует созданию государственно-частного партнерства, способного в полной мере обеспечить максимальную интеграцию имеющихся технологических, финансовых, кадровых и других ресурсов для достижения лидирующих позиций России на мировом космическом рынке.

Космические программы имеют длительный срок окупаемости, что непривлекательно для частных инвесторов, заинтересованных в краткосрочном финансовом результате и быстрой экономической отдаче.

### 3. Объем и качество пусковых услуг.

Чтобы оценить уровень России в части объема и качества пусковых услуг, необходимо рассмотреть статистику пусков ракет-носителей в мировом масштабе.

На рис. 2. представлено распределение пусков по странам в мире за последние 5 лет.

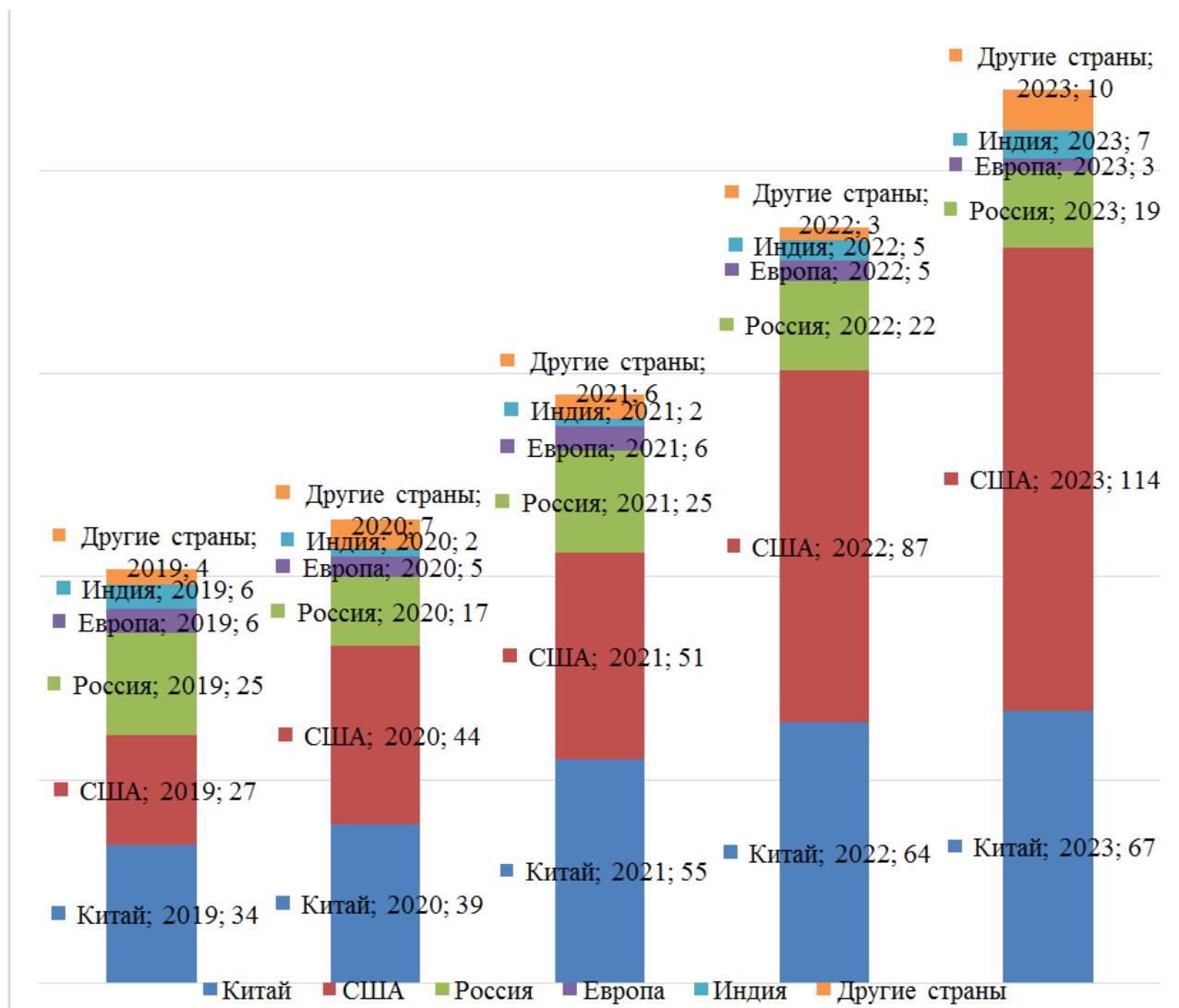


Рис. 2. Распределение пусков по странам в мировом масштабе, 2019–2023 годы

Осуществив 108 пусков ракет-носителей за последние 5 лет, Россия является абсолютным лидером по обеспечению их безаварийности. За этот же период времени у других государств было совершено 44 аварийных пуска, только в 2023 году этот показатель составил 9 ед. (3 – США, 2 – КНДР, 1 – Иран, 1 – Япония, 1 – Новая Зеландия, 1 – Китай). В общей сложности было потеряно 16 спутников.

В табл. 2 представлена информация по актуальным отечественным средствам выведения, находящимся в эксплуатации, а также в стадии опытно-конструкторской разработки.

Современные тенденции в части ракетных технологий свидетельствуют о том, что конструкция средств выведения и далее будет совершенствоваться в направлении развития уни-

фикации за счет модульного построения РН, а также полного перехода на экологически чистые виды топлива.

Таблица 2

### Отечественные средства выведения

Ракета-носитель	Конструкция
«Союз-2»	Ракеты-носители (далее – РН) данного семейства представлены легким и средним классами. Доставляют космические аппараты (далее – КА) на низкие, а с использованием разгонного блока (далее – РБ) «Фрегат» и на высокие околоземные орбиты, на отлетные траектории
«Союз-5»	Перспективная РН среднего класса без использования токсичных компонентов ракетного топлива для запуска КА на солнечно-синхронные, высокоэллиптические, геопереходные и геостационарные орбиты
«Амур-СПГ»	Принципиально новая РН среднего класса, выполненная по тандемной схеме, с многоразовой первой ступенью на компонентах топлива «жидкий кислород – сжиженный природный газ» для экономически эффективного развертывания многоспутниковых орбитальных группировок
«Ангара»	Новейшее семейство модульных экологически безопасных РН легкого и тяжелого классов
«Ангара-А5В»	РН тяжелого класса повышенной грузоподъемности для вывода тяжелых КА, межпланетных станций и кораблей за пределы околоземной орбиты
«Протон-М»	РН тяжелого класса для запуска КА и элементов орбитальных станций на различные орбиты

#### 4. Сегмент пилотируемой космонавтики.

Исторически Россия всегда занимала лидирующие позиции в секторе пилотируемой космонавтики, а с 2011 по 2020 год являлась практически единственным государством, имеющим возможности оперативной и безаварийной доставки космонавтов и полезных грузов к Международной космической станции (МКС). По состоянию на 2024 год такими компетенциями обладают три страны: Россия, США, Китай.

#### 5. Создание многоразовых средств выведения.

Весной 2023 года АО «РКЦ «Прогресс» начало работу над техническим проектированием космического ракетного комплекса «Амур-СПГ», в состав которого входит РН среднего класса «Амур» на сжиженном природном газе с возвращаемым блоком первой ступени, отвечающая всем современным мировым тенденциям. Техническое проектирование планируется завершить в конце 2024 года. Указанной инновационной разработке уделяется особое внимание как на уровне Госкорпорации «Роскосмос», так и на уровне Правительства Самарской области [2].

В 2023 году АО «ГРЦ Макеева» продолжило научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки в части подтверждения ключевых технологий создания многоразовой одноступенчатой РН «Корона» вертикального взлета и посадки, способной выводить/возвращать грузы на орбиту/с орбиты. Кроме того, она может использоваться в качестве транспортного корабля для суборбитальных полетов неограниченной дальности.

В настоящее время прослеживается тенденция к обеспечению доступности пусковых услуг с удельным снижением стоимости запуска полезной нагрузки в космос, ввода элементов многоразового использования с перспективой применения частично многоразовых РН, построенных с использованием технологий опережающего развития и перспективой построения средств выведения, способных на протяжении длительного времени выполнять целевые задачи в состоянии, близком к первоначальному (заводскому) виду.

#### 6. Наземная пусковая инфраструктура.

Первый в мире и самый большой космодром площадью 6 717 кв. км расположен в Республике Казахстан, который совместно с одноименным городом представляет собой комплекс «Байконур», арендуемый Россией у Казахстана до 2050 года.

Космодром обеспечивает полный цикл предстартовой подготовки и запуска спутников в рамках Федеральной космической программы, международного сотрудничества и немно-

гочисленных коммерческих заказов. Сейчас ведется работа по созданию космического ракетного комплекса «Байтерек» в рамках международного проекта. При этом проектная мощность комплекса составляет 6–8 пусков ракет в год [3].

Наземная инфраструктура космодрома включает стартовые и технические комплексы для РН «Союз-2» и «Протон-М», пять монтажно-испытательных корпусов, станции для заправки КА и РБ, кислородно-азотный завод, аэропорт Крайний, а также измерительный комплекс приема и обработки данных телеметрической информации.

Второй российский космодром «Восточный», расположенный в Амурской области, призван обеспечить автономный доступ в космическое пространство с территории РФ.

Наземная инфраструктура космодрома включает два стартовых комплекса и единый технологический комплекс для подготовки РН и КА. С первого стартового комплекса с 2016 года по июль 2024 года было запущено 16 РН «Союз-2». На втором стартовом комплексе проводятся испытания модульных РН «Ангара», ориентированных на реализацию проектов по созданию российской перспективной орбитальной станции и изучения дальнего космоса. К инфраструктуре «Восточного» также относятся башни обслуживания, позволяющие осуществлять все предстартовые подготовительные работы практически в любых климатических условиях.

### 7. Производство космических аппаратов.

Исследования глобальной космической деятельности стран по результатам 2023 года позволили провести анализ запусков космических аппаратов, представленных на рис. 3, определив тем самым место Российской Федерации в этой нише.

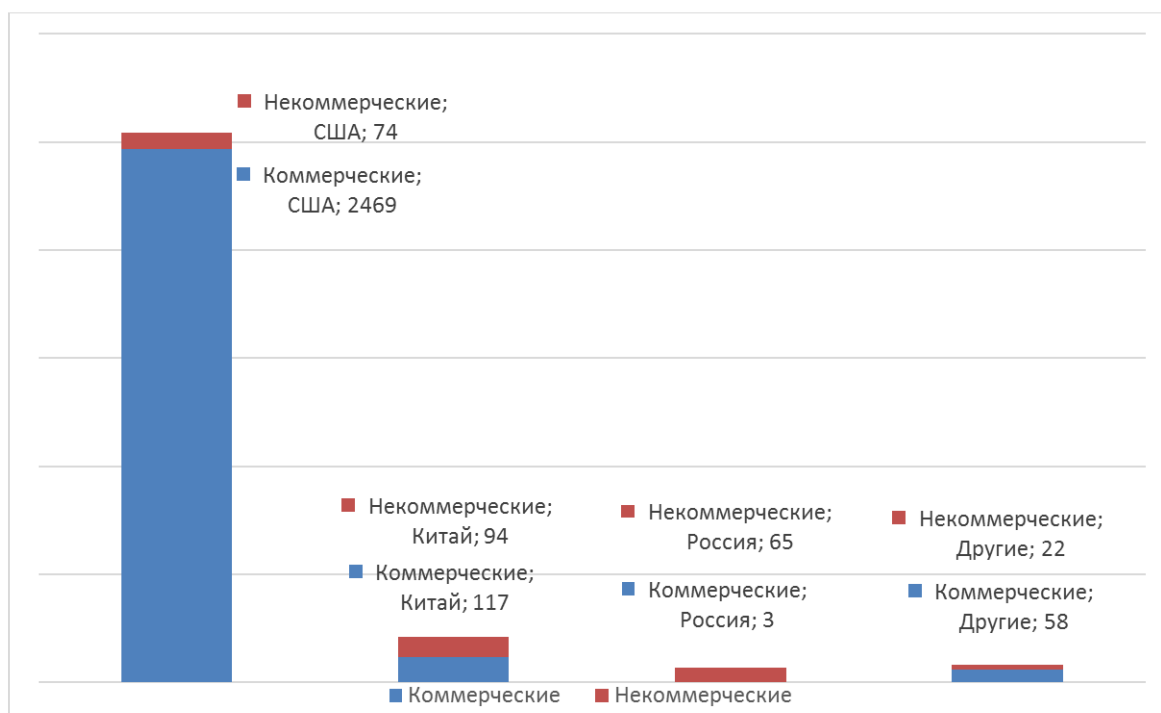


Рис. 3. Распределение запусков КА всех категорий масс в 2023 году

Всего в 2023 году было запущено 2 905 КА (в том числе пилотируемых и грузовых кораблей, модулей МКС), что показало рост на 17,5%, по сравнению с данными 2022 года коммерческий сектор за год увеличился на 18%.

Лидерство США в данном сегменте объясняется большим количеством запущенных аппаратов системы *Starlink* компании *SpaceX* (1 984 КА).

Как было отмечено выше, частный рынок отечественного ракетно-космического комплекса критически мал, о чем свидетельствуют данные на графике, где на долю коммерческих запусков приходится всего 4,4% (3 КА) из 68 запущенных в 2023 году российских космиче-



ских аппаратов. Анализ данных по распределению запусков спутников показал, что этот рынок в глобальном масштабе представлен, в основном, спросом на запуски аппаратов в интересах частных, коммерческих заказчиков, который составляет 91% от объема всего рынка.

Российский спутниковый сегмент представлен орбитальными группировками космических аппаратов систем связи и ретрансляции, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), спутниковой системы ГЛОНАСС.

В табл. 3 приведены КА отечественного производства.

Самый крупномасштабный проект «Сфера» находится в активной фазе разработки и будет включать в себя орбитальные группировки КА связи и ДЗЗ.

Тенденции в нише спутниковых технологий нацелены на использование унифицированных технологических платформ, в том числе в части космической связи, навигации, дистанционного зондирования Земли.

Тенденция к минимизации космических аппаратов без снижения их тактико-технических характеристик продолжит оказывать воздействие на создание и пополнение многоспутниковых орбитальных группировок. Кластерные системы спутников, образующие систему-формацию, могут превзойти возможности самых крупных современных космических платформ. При этом их небольшие габариты и стоимость позволяют в короткие сроки и с меньшими потерями совершенствовать технологии и создавать эффективные космические системы.

Таблица 3

### Космические аппараты РФ (функционирующие и находящиеся на стадии разработки)

Космические системы и аппараты	Описание
<b>Связь и ретрансляция</b>	
«Гонец» (КА «Гонец-М»)	Система связи с двухсторонней передачей данных, услуги подвижной спутниковой связи абонентам
«Луч» (КА «Луч-5»)	Обеспечение связью объектов ракетно-космической техники: верхние ступени РН, РБ, КА, отечественный сегмент МКС. Осуществление передачи сигналов системы спасения КОСПАС-САРСАТ, данных ДЗЗ, метеоданных
<b>Дистанционное зондирование Земли</b>	
«Ресурс-П»	Высокодетальное широкозахватное оптико-электронное зондирование Земли с разрешением 0,7 м
«Ресурс-ПМ»	Высокодетальное наблюдение Земли в видимом и коротковолновом ИК-диапазоне с разрешением 0,3–0,5 м
«Ионосфера-М»	Мониторинг геофизической обстановки
«Метеор-М»	Оперативная метеорология, мониторинг климата, гидрологии, окружающей среды, чрезвычайных ситуаций, ледовой обстановки полярных районов и т. д.
«Электро-Л»	Многоспектральная съемка облачности и подстилающей земной поверхности. Осуществление обмена гидрометеорологическими данными, ретрансляция сигналов аварийной системы КОСПАС-САРСАТ
«Обзор-Р»	Круглосуточная высокодетальная радиолокационная съемка в любых погодных условиях
«Кондор-ФКА»	Круглосуточная радиолокационная съемка высокого и среднего разрешения
«Арктика-М»	Непрерывное высокополярное гидрометеорологическое наблюдение Арктического региона
«Аист-2Т»	Стереоскопическая съемка Земли с разрешением 1,9 м
«Канопус-В»	Высокодетальная оптико-электронная съемка в видимом и ИК-диапазонах
<b>Навигация</b>	
ГЛОНАСС	Координатно-временное и навигационное обеспечение потребителей в глобальном безвозмездном и неограниченном масштабе

Окончание табл. 3

Космические системы и аппараты	Описание
<b>Федеральный проект «Сфера» Связь и ретрансляция</b>	
СКИФ (планируется 6 КА с запусками в 2026–2027 гг.)	Предоставление коллективного широкополосного доступа к сети Интернет, обеспечение каналов связи в отдаленных районах РФ
«Беркут-С»	Обеспечение обмена данными между автоматизированными объектами земного сегмента, предоставление высокоскоростного доступа в информационные сети (в том числе с использованием абонентских устройств сетей сотовой связи)
«Марафон IoT» (планируется 132 КА с запусками в 2024–2028 гг.)	Обеспечение передачи данных для устройств «Интернета вещей», решение задач гражданской и беспилотной авиации
«Экспресс-РВ»	Обеспечение высокоскоростной связи и широкополосного доступа к сети Интернет в акватории Северного морского пути и Арктике
«Ямал» (запуск в 2026 г.)	Обеспечение широкополосного доступа к информационным ресурсам, создание магистральных спутниковых каналов
<b>Дистанционное зондирование Земли</b>	
«Беркут-Х/РСА»	Радиолокационный мониторинг ледовой обстановки на Северном морском пути, чрезвычайных ситуаций
«Сфера-Грифон» (планируется 136 МКА, с началом запусков в 2024 г.)	Глобальный мониторинг поверхности Земли с пространственным разрешением 2,5 м
«Беркут-ВД»	Оптико-электронная съемка с пространственным разрешением 0,5 м
«Беркут-ВР»	Оптико-электронная съемка с пространственным разрешением 1 м
СМОТР	Мониторинг выбросов парниковых газов и утечек метана, высокоточное наблюдение

### 8. Коммерциализация данных ДЗЗ.

В апреле 2024 года Государственная дума ФС РФ приняла законопроект, по которому органы государственной и муниципальной власти, работающие по 44-ФЗ о государственных закупках, будут платно приобретать данные ДЗЗ.

Госкорпорация «Роскосмос» сможет продавать органам власти данные из федерального фонда данных ДЗЗ, в который также будут передаваться данные с негосударственных космических аппаратов.

Такого рода коммерциализация сможет стимулировать развитие отечественной спутниковой группировки. В то же время есть риск его консолидации вокруг госкорпорации, что может оказать негативное влияние на конкуренцию и инновации в этой области.

Закон вступит в силу с 1 января 2025 года и будет способствовать обеспечению бюджетной эффективности, закрытости некоторой информации в интересах национальной безопасности, позволит сформировать условия для развития отечественного рынка данных, привлечения внебюджетных денежных средств, наращивания количества отечественной спутниковой группировки.

### 9. Международная космическая станция.

Несмотря на первоначальный план по прекращению участия Российской Федерации в функционировании МКС, в начале 2024 года стало известно о продлении работы российского сегмента до 2028 года.

Российские транспортные пилотируемые корабли «Союз МС» и грузовые «Прогресс МС» используются для доставки/возвращения экипажей космонавтов и доставки грузов, топлива, воды, сжатых газов и других элементов жизнеобеспечения людей и обеспечения работоспособности станции соответственно.

В данный момент осуществляется разработка пилотируемого транспортного корабля нового поколения, предназначенного для доставки людей и грузов на околоземную орбитальную станцию и к Луне. Возвращаемый аппарат корабля разрабатывается как многоразовый.

#### 10. Российская орбитальная станция (РОС).

РОС разрабатывается как пилотируемая лаборатория для космических исследований ресурсов Земли и Солнечной системы, а также она призвана стать производственной базой для создания уникальных материалов, сборки конструкций, отработки технологий производства биопродуктов, вакцин и их компонентов. Открытая архитектура позволит менять модули, что сделает срок службы РОС неограниченным [4].

Реализация программы будет осуществляться в два этапа:

- 1) запуск научно-энергетического модуля в 2027 году, узлового и шлюзового – в 2028 году, базового – в 2029 году;
- 2) дооснащение РОС целевыми модулями (в том числе свободно летающими) до 2032 года.

#### 11. Лунная программа.

После неудачного запуска в 2023 году для исследования Луны автоматической станции «Луна-25», госкорпорацией «Роскосмос» было принято решение продолжать программу: планируется запуск в 2027 году станции «Луна-26» по исследованию полярной орбиты Луны, а в 2028 году – посадочного аппарата «Луна-27» для взятия и изучения лунного грунта.

#### 12. Международная интеграция.

За последние 5 лет, в условиях жесткой санкционной политики, система отраслевой и межотраслевой кооперации отечественных ракетно-космических предприятий с зарубежными контрагентами претерпела ряд критических изменений, направив имеющиеся ресурсные возможности и компетенции на развитие импортозамещающей базы.

Если раньше международное сотрудничество осуществлялось нередко в закупочной сфере, в совместных разработках, в научно-прикладных исследованиях и имело обширную географическую принадлежность, то в настоящее время международная кооперация жестко ограничена географической локацией и сферами, глобально не влияющими на стратегическую независимость и безопасность страны.

В табл. 4 приведены ключевые нормативно-правовые акты, отражающие международное сотрудничество РФ с другими государствами в ракетно-космической сфере, которые заключались в пятилетней ретроспективе [5].

Таблица 4

**Сводная таблица нормативных актов, отображающих международное сотрудничество РФ с другими государствами**

Страна	Наименование акта	Год подписания
Алжир	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Алжирской Народной Демократической Республики о сотрудничестве в области исследования и использования космического пространства в мирных целях	2023
Ангола	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Ангола о сотрудничестве в области исследования и использования космического пространства в мирных целях	2019
Аргентина	Протокол между Правительством Российской Федерации и Правительством Аргентинской Республики о сотрудничестве в области исследования и использования космического пространства в мирных целях	2019

Окончание табл. 4

Страна	Наименование акта	Год подписания
Белоруссия	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о сотрудничестве в области использования и развития российской глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС	2021
	Концепция научно-технической программы Союзного государства «Разработка базовых элементов орбитальных и наземных средств в интересах создания многоспутниковых группировок малоразмерных космических аппаратов наблюдения земной поверхности и околоземного космического пространства» («Комплекс-СГ»)	2021
Индия	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Индии о мерах по охране технологий в связи с сотрудничеством в области исследования и использования космического пространства в мирных целях и в создании и эксплуатации средств выведения и наземной космической инфраструктуры	2021
Казахстан	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Казахстан о сотрудничестве по осуществлению пусков с космодрома Байконур ракет-носителей типа «Союз-2» в северном направлении для запусков космических аппаратов на приполярные орбиты	2019
Китай	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Китайской Народной Республики о сотрудничестве в области создания Международной научной лунной станции (МНЛС)	2022
Мексика	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Мексиканских Соединенных Штатов о сотрудничестве в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях	2021
Объединенные Арабские Эмираты	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Объединенных Арабских Эмиратов о сотрудничестве в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях	2021
Таджикистан	Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Таджикистан о сотрудничестве в области исследования и использования космического пространства в мирных целях	2023
Страны СНГ (Армения, Белоруссия, Казахстан)	Протокольное решение экономического совета СНГ «О сотрудничестве государств – участников СНГ по интеграции наземных инфраструктур, использующих сигналы системы ГЛОНАСС»	2021
Страны СНГ (Азербайджан, Армения, Белоруссия, Казахстан, Кыргызстан, Молдова, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан)	Решение Совета глав правительств СНГ «О Межгосударственной радионавигационной программе государств – участников Содружества Независимых Государств на 2023–2026 годы»	2022
	Решение Совета глав правительств СНГ «О Межгосударственной программе сотрудничества государств – участников СНГ в сфере геодезии, картографии, пространственных данных, геоинформационных технологий, дистанционного зондирования Земли, кадастрового учета и регистрации прав на недвижимое имущество на период до 2026 года»	2023

Ключевые партнеры России в ракетно-космической сфере на данный момент представлены в табл. 5, составленной автором на основании источника [5].

Таблица 5

**Текущее международное сотрудничество РФ в ракетно-космической деятельности**

Страна	Описание взаимодействия
Беларусь	1. Создание совместного КА для высокодетального оптико-электронного наблюдения Земли. 2. В 2024 г. Роскосмосом подготовлен и осуществлен полет космонавта Беларуси
Казахстан	1. Взаимодействие на космодроме Байконур в условиях его аренды Российской Федерацией. 2. Совместный проект по созданию космического ракетного комплекса «Байтерек» с РН «Союз-5»
Бразилия	На территории Бразилии функционируют четыре наземные станции ГЛОНАСС и российский оптико-электронный комплекс обнаружения и измерения параметров космического мусора
Китай	1. Совместные исследования Луны и дальнего космоса. 2. Сотрудничество в области спутниковой навигации, дистанционного зондирования Земли
ЮАР	1. В 2018 г. в ЮАР установлена квантово-оптическая система «Сажень-ТМ», входящая в наземную инфраструктуру российской системы ГЛОНАСС. 2. В 2022 г. на территории Центра космических операций Южно-Африканского национального космического агентства установлен российский оптико-электронный комплекс обнаружения и измерения параметров космического мусора
Иран	1. Сотрудничество по освоению космоса в рамках постоянной Российско-Иранской комиссии по торгово-экономическому сотрудничеству. 2. Приоритетное взаимодействие в части запусков КА, ДЗЗ, картографии, навигации и др. 3. С помощью российских РН выведены КА ДЗЗ <i>Khayaam</i> и <i>Pars-1</i>

Проведенный анализ международной интеграции и сотрудничества Российской Федерации с зарубежными странами выявил связи с 21 страной в четырех основных группах стран (СНГ, ЕАЭС, БРИКС и страны, участвующие в проекте МКС) в области космической деятельности. Наиболее активными странами являются Китай, Белоруссия, страны СНГ.

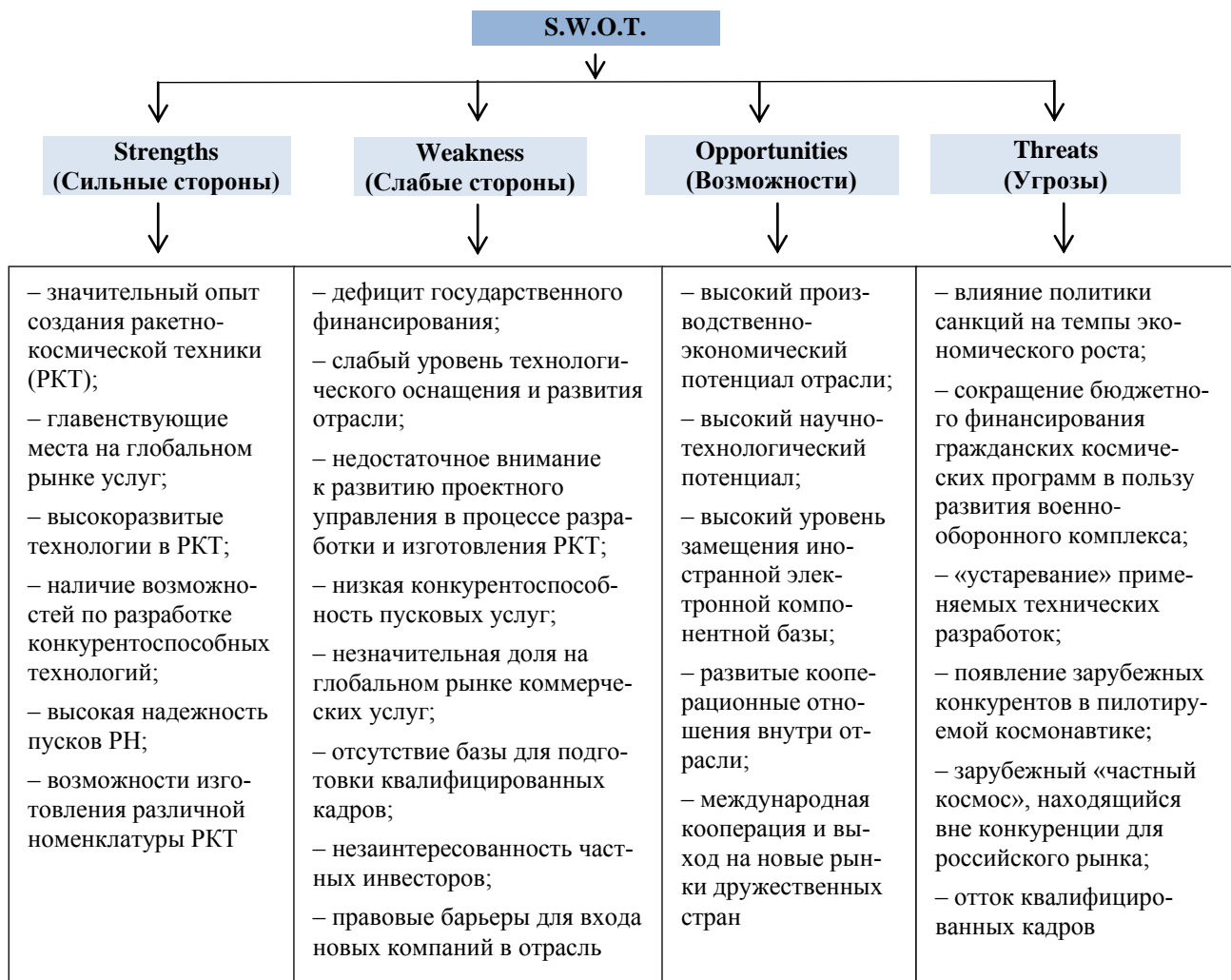
В данный момент актуальны как никогда меры по предотвращению потенциальных внешних угроз, проявляющихся в следующем:

- разобщенности государств-участников космической деятельности, повышении их автономизации и независимости;
- санкционной политике, направленной на Россию;
- планах США по достижению повсеместного контроля в околоземном пространстве и дальнем космосе;
- нарастании угрозы милитаризации космического пространства, созданию противоспутниковых группировок государствами, обладающими технологиями ракетно-космической деятельности.

В современных условиях при оптимистичном прогнозе усилия Российской Федерации по-прежнему должны быть направлены на попытки мирных переговоров с недружественными государствами по предотвращению размещения оружия в космосе, применению направленных противоспутниковых технологий, при пессимистичном – на интенсивную разработку собственных «оборонительных» технологий, способных обеспечить защиту как космических объектов, так и объектов наземной инфраструктуры.

Для наглядной идентификации текущего положения российской ракетно-космической деятельности в привязке к отраслевым тенденциям автором проведено исследование текущего положения ракетно-космической отрасли РФ посредством SWOT-анализа, представляющего собой метод стратегического планирования на основе выявления факторов внутренней и внешней среды любой единой структуры (предприятие, отрасль, государственное ведом-

ство, образовательное учреждение и т. д.) и являющегося основой для принятия стратегически важных решений по дальнейшему развитию и реформированию отрасли (рис. 4) [6].



*Рис. 4. SWOT-анализ ракетно-космической деятельности в России*

Анализ состояния ракетно-космической отрасли России, ее современной сегментации и ключевых показателей выявляет ряд проблем организационно-методического, научного, технико-технологического, кадрового и финансового характера, требующих решения и создания стратегических векторов развития, базирующихся на нескольких принципах, к которым относятся:

- создание и развитие принципиально новых видов космической деятельности с последующим вовлечением их в экономическую систему;
- создание национально независимых производственных систем;
- стимулирование инновационного развития посредством осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- достижение оптимального баланса между ускоренным восстановлением космической индустрии и наращиванием темпов ее инновационного развития [7].

Проводимая государством стратегия осуществления ракетно-космической деятельности направлена на создание единого конгломерата/госкорпорации путем объединения всех участвующих субъектов ракетно-космической деятельности в один управленческий орган.

Госкорпорация «Роскосмос», объединяющая 115 организаций, является головной организацией отечественной ракетно-космической отрасли, которая представляет собой разнород-

ную имущественную базу со специфичными направлениями деятельности, разной степенью закрытости, в том числе в части инноваций и научно-технических разработок [8].

В краткосрочной перспективе такое сосредоточение имеющихся ресурсов способно обеспечить эффективную концентрацию и показать быстрый результат. Однако при среднесрочной и долгосрочной перспективах указанная структурная кластеризация может привести к ограничению здоровой конкуренции внутри отрасли (кроме того, это может ограничить конкурентоспособность и на международном рынке), а также к политическому и правовому диктату управляющей институциональной единицы.

Госкорпорация «Роскосмос» одновременно выполняет три функции:

- *заказчика* (размещение проектных заказов);
- *исполнителя* (участник наукоемких и высокотехнологичных проектов, с одной стороны, представитель РФ в федеральных предприятиях и акционерных обществах – с другой);
- *регулятора* (техническая и правовая координация, регулирование отрасли, в том числе в части лицензирования ракетно-космической деятельности, определение спроса и уровня прибыльности).

Очевидно, что в Российской Федерации, в отличие от большинства зарубежных стран, преобладает нерыночный характер деятельности в ракетно-космическом сегменте с превалированием государственного оборонного заказа (ГОЗ), что в некоторой степени противоречит правилам современного бизнес-менеджмента, когда одно структурное объединение является и заказчиком, и исполнителем.

На основании изложенного представляется целесообразным сформулировать наиболее важные тенденции развития ракетно-космической деятельности как в глобальном масштабе, так и в общероссийском с разделением на два вектора: в части тенденций, связанных со средствами выведения, и в части производства космических аппаратов.

В частности, к основным тенденциям мирового космического рынка в части средств выведения можно отнести следующие тенденции.

1. Рост предложений относительно спроса со стороны государственных и частных заказчиков пусковых услуг.
2. Изменение подхода к имеющимся технологиям создания ракет-носителей с учетом принципов модульного построения «в угоду» использованию многоразовых элементов.
3. Освоение метана и других перспективных компонентов топлив («кислород + метан», «кислород + биопропан») в интересах мировой экологической политики.
4. Приоритетное использование аддитивных технологий.
5. Минимизация времени подготовки пуска РН.
6. Расширение возможностей РН за счет создания универсальных блоков выведения.

Перечислим общие тенденции мирового космического рынка в части КА:

1. Снижение стоимости и сроков создания КА.
2. Использование унифицированных платформ, особенно активно в области космической связи, навигации и ДЗЗ.
3. Формирование многоспутниковых орбитальных группировок на базе малых космических аппаратов (МКА).
4. Формирование группировок КА ДЗЗ как с разным пространственным разрешением, так и, в перспективе, с различными физическими принципами (радарная и оптическая съемка).
5. Существенное увеличение пространственного разрешения в разных диапазонах съемки.
6. Повышение оперативности предоставления телеметрической информации, вплоть до съемки on-line и возможность прямой передачи заданий на съемку самими пользователями.
7. Расширение поляризационных возможностей и появление возможности одновременной съемки в четырех поляризациях.

На российском космическом рынке можно выделить также следующие ориентиры:

1. Создание Российской орбитальной станции к 2032 году.

2. Создание низкоорбитальной спутниковой группировки с целью обеспечения связи, навигации, телевидения, передачи данных для «Интернета вещей» на территории всей страны и ретрансляции к 2030 году.

3. Создание перспективного транспортного и пилотируемого космического корабля к 2028 году (стартовая масса – 16,5–22,0 т).

4. Ускоренное наращивание российской орбитальной спутниковой группировки до 250 КА ежегодно к 2030 году.

5. Создание к 2025 году Национального центра дистанционного зондирования Земли, который обеспечит полномасштабное управление и целевое применение орбитальной группировки в составе не менее 30 государственных КА ДЗЗ.

6. Переход Госкорпорации «Роскосмос» на индустриальную модель производства КА, которая позволит изготавливать до 400 аппаратов различного назначения в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая статья посвящена анализу состояния и развития ракетно-космической деятельности в Российской Федерации. На основе проведенного исследования выдвинуты прогнозные тенденции развития ракетно-космической деятельности как в глобальном масштабе, так и в общероссийском с разделением на два вектора: в части тенденций, связанных со средствами выведения, и в части производства космических аппаратов.

Вместе с тем проведенное исследование показало, что ракетно-космический комплекс России, несмотря на выдающиеся достижения прошлого и существенный вклад в развитие мировой космонавтики, сегодня сталкивается с рядом значимых вызовов. Среди главных проблем можно выделить высокую степень износа материально-технической базы, что существенно ограничивает возможности отрасли в реализации современных космических программ. Это указывает на необходимость масштабной модернизации производственных мощностей и обновления устаревшего оборудования, без чего невозможно сохранить конкурентоспособность РКК на мировом уровне.

Сравнительный анализ с лидерами отрасли, такими как США, Китай и страны Европейского Союза, показал, что Россия значительно отстает в области внедрения инновационных технологий и коммерциализации космических запусков.

Несмотря на указанные трудности, существуют возможности для роста, они связаны с развитием кооперации с дружественными странами, с внедрением цифровых технологий и расширением спектра космических программ. Кроме того, необходимо обратить внимание на усиление инновационной активности и привлечение частных инвестиций, что позволит отрасли не только сохранить текущие позиции, но и выйти на новые рубежи развития. Важно продолжать работу по снижению технологической зависимости от иностранных поставщиков и адаптации к санкционным ограничениям, что повысит устойчивость российской космической отрасли в современных условиях и ее технологическое лидерство.

## Список используемых источников

1. Ходыкин А. В. Конкурентоспособность российской космической отрасли на мировом рынке космических услуг // Вестник университета. – 2020. – № 10. – С. 74–80.

2. Вячеслав Федорищев и Юрий Борисов обсудили развитие ракетно-космической отрасли. – URL: <https://rg.ru/amp/2024/08/29/reg-pfo/viacheslav-fedorishchev-i-iurij-borisov-obsudili-razvitie-raketno-kosmicheskoy-otrasli> (дата обращения: 09.09.2024).

3. Проектная мощность ракетного комплекса «Байтерек» в Казахстане составит 6–8 пусков в год. – URL: <https://tass.ru/kosmos/21216045/amp> (дата обращения: 09.09.2024).



4. Российская ракетно-космическая отрасль : [презентация Госкорпорации «Роскосмос»]. – М., 2024. – URL: <http://komitet-ekpol.duma.gov.ru/novosti/722f2160-bbc9-4fbd-9a92-505ae51261f0> (дата обращения: 09.09.2024).
5. Международное сотрудничество : [официальный сайт Госкорпорации «Роскосмос»]. – URL: <https://www.roscosmos.ru/22885/> (дата обращения: 09.09.2024).
6. *Родригес Пендас А. А., Протащук В. Ф.* Разработка подходов к оценке изменений структуры кооперации головных исполнителей Гособоронзаказа // Научный вестник ОРК России. – 2019. – № 4. – С. 30–42.
7. *Рыкова И. Н., Шкодинский С. В., Комаров И. И.* Стратегические императивы развития российской космической индустрии // Экономика. Налоги. Право. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 44–55.
8. *Комаров И. И.* О разработке карты стратегических ориентиров для устойчивого развития предприятий российской космической отрасли // Проблемы современной экономики. – 2022. – № 1(81). – С. 223–226.

С. Е. Алешичев,  
кандидат технических наук, доцент;  
В. В. Дуга,  
кандидат технических наук;  
С. С. Рябова,  
кандидат технических наук;  
А. М. Сычева,  
доктор технических наук, профессор

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ЖАРСТОЙКОГО ПЕНОБЕТОНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГАЗОХОДЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА «АНГАРА»

Рассматривается методика обработки экспериментальных данных, полученных в ходе исследования физико-механических свойств жаростойкого пенобетона, с целью формирования математических моделей, позволяющих спрогнозировать свойства разрабатываемых составов жаростойкого пенобетона, а также для оценки степени влияния существенных факторов процесса получения пенобетона на формирование его свойств.

Ключевые слова: математическая обработка, экспериментальные данные, формирование физико-механических свойств, жаростойкий пенобетон, морозостойкость.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в ракетно-космической отрасли возрастают требования к конструкции наземных ракетно-космических комплексов с целью увеличения их долговечности. Одним из ключевых элементов таких конструкций являются газоходы стартовых сооружений. Требования предъявляются не только к прочностным характеристикам газоходов, но и к их жаростойкости. Основой данных конструкций служит бетон, а также сопутствующие элементы – металлооблицовка, материалы для заделки стыков и швов между бетонными плитами и пр. [1].

При запуске ракеты-носителя газоходы подвергаются экстремальному тепловому воздействию и высокому давлению газов, возникающих в результате отвода газодинамической струи, что приводит к деградации конструкций газоходов и сокращению сроков их эксплуатации [2]. В связи с этим разработка новых жаростойких материалов, использование которых повысит долговечность конструкций газоходов и обеспечит необходимое количество пусков ракет-носителей, становится актуальной задачей. В данной статье представлены результаты обработки экспериментальных данных по получению жаростойкого пенобетона с заданными свойствами.

### ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В ходе проведения натурных экспериментов была исследована зависимость физико-механических свойств жаростойкого пенобетона от характеристик факторов, оказывающих существенное влияние на формирование его свойств. Все физико-механические характеристики жаростойкого пенобетона были установлены в соответствии с нормативной документацией.

1. **Жаростойкость** ( $Y_1$ ) – класс пенобетона по предельно допустимой температуре применения И6 (600 °С), °С (в соответствии с ГОСТ 20910):

- 1.1.  $x_1$  – количество тонкомолотой добавки, %;
- 1.2.  $x_2$  – удельная поверхность добавки, см<sup>2</sup>/г;

- 1.3.  $x_3$  – количество фибры, %;
- 1.4.  $x_4$  – общая потеря массы образцом, мг;
- 1.5.  $x_5$  – количество цемента, кг/м<sup>3</sup>.

2. **Морозостойкость** ( $Y_2$ ) – марка пенобетона по морозостойкости,  $F$ , (в соответствии с ГОСТ 25485):

- 2.1.  $x_1$  – количество фибры, %;
- 2.2.  $x_2$  – длина фибры, мм;
- 2.3.  $x_3$  – диаметр расплыва пенобетонной смеси по вискозиметру Сутгарда, см;
- 2.4.  $x_4$  – температура температурно-влажностного режима твердения, °С.

3. **Прочность на сжатие** ( $Y_3$ ), кг/м<sup>2</sup>, (в соответствии с ГОСТ 10180):

- 3.1.  $x_1$  – количество тонкомолотой добавки, %;
- 3.2.  $x_2$  – количество фибры, %;
- 3.3.  $x_3$  – диаметр расплыва пенобетонной смеси по вискозиметру Сутгарда, см;
- 3.4.  $x_4$  – температура температурно-влажностного режима твердения, °С;
- 3.5.  $x_5$  – количество цемента, кг/м<sup>3</sup>.

4. **Количество воздушных теплосмен** ( $Y_4$ ) – марка пенобетона по термической стойкости в воздушных теплосменах, шт., (в соответствии с ГОСТ 20910):

- 4.1.  $x_1$  – количество тонкомолотой добавки, %;
- 4.2.  $x_2$  – удельная поверхность добавки, см<sup>2</sup>/г;
- 4.3.  $x_3$  – количество фибры, %;
- 4.4.  $x_4$  – количество цемента, кг/м<sup>3</sup>;
- 4.5.  $x_5$  – общая потеря массы образцом, мг.

Цель математической обработки полученных экспериментальных данных – получение уравнения регрессии, по возможности линейной регрессии, с минимальным количеством коэффициентов, т. е. определение значимых факторов при условии адекватности модели экспериментальным данным. В общем виде уравнение линейной регрессии имеет вид

$$Y_j = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n, \quad (1)$$

В формуле (1) введены следующие обозначения:  $Y_j$  – вычисленное значение  $j$ -го свойства пенобетона;  $b_0, b_1, \dots, b_n$  – коэффициенты регрессии;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – значения факторов, влияющих на данное свойство пенобетона. Вместе с тем значения  $Y_j$ , а также  $x_1, x_2, \dots, x_n$  имеют свою физическую (натуральную) размерность.

Необходимо отметить, что по коэффициентам регрессии, полученным при обработке данных, которые имеют физическую размерность, нельзя определить, какой из факторов оказывает более или менее значимое влияние на свойства пенобетона, так как коэффициенты регрессии между собой несопоставимы ввиду их различной размерности. Размерность коэффициента регрессии определяется отношением размерности фактора, оказывающего существенное влияние на формирование свойства пенобетона, к размерности свойства пенобетона.

Для того чтобы иметь возможность оценить влияние каждого фактора на прогнозируемые значения свойств жаростойкого пенобетона, в том числе ранжировать факторы по степени влияния путем сравнения коэффициентов, следует полученные экспериментальные данные представить в нормированном виде. Это позволит в ходе их математической обработки сформировать уравнения регрессии со стандартизованными коэффициентами, которые показывают, на сколько единиц изменится результат, если соответствующий фактор  $x_i$  изменится на одну единицу при неизменном среднем уровне других факторов. В указанном случае в силу того, что все переменные заданы как нормированные, стандартизованные коэффициенты регрессии можно сравнивать между собой [3, 4].

Для формирования массивов данных в нормированном виде произведена математическая обработка значений факторов, полученных в натуральных единицах:

$$\delta x_i = 2 \cdot \frac{x_i - \frac{x_{i_{\max}} + x_{i_{\min}}}{2}}{x_{i_{\max}} - x_{i_{\min}}}, \quad (2)$$

где  $\delta x_i$  – нормированное значение  $i$ -го фактора;  
 $x_i$  – значение  $i$ -го фактора, в натуральных единицах;  
 $x_{i_{\max}}$  и  $x_{i_{\min}}$  – максимальное и минимальное значения  $i$ -го фактора соответственно, в натуральных единицах.

При этом уравнение линейной регрессии со стандартизованными коэффициентами будет иметь вид

$$\delta y_{j \text{ выч.}} = a_0 + a_1 \cdot \delta x_1 + a_2 \cdot \delta x_2 + \dots + a_n \cdot \delta x_n, \quad (3)$$

где  $\delta y_{j \text{ выч.}}$  – нормированное значение  $j$ -го свойства пенобетона;  
 $a_0, a_1, \dots, a_n$  – стандартизованные коэффициенты регрессии.

В табл. 1–4 приведены полученные в ходе исследования экспериментальные данные, представленные в нормированном виде. Кроме того, представлены полученные с применением метода наименьших квадратов уравнения регрессии со стандартизованными коэффициентами для указанных выше четырех свойств жаростойкого пенобетона.

Проверка значимости полученных уравнений регрессии по критерию Фишера показала, что все уравнения в целом значимы при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  и адекватно описывают экспериментальные данные.

На рис. 1–4 представлены диаграммы, наглядно показывающие совпадение экспериментальных и вычисленных количественных характеристик пенобетона.

Таблица 1

**Экспериментальное исследование жаростойкости пенобетона –  
класс пенобетона по предельно допустимой температуре  
применения ИБ (600 °С)**

№ п/п	Относительные единицы (безразмерные)						
	Количество тонкомолотой добавки	Удельная поверхность добавки	Количество фибры	Общая потеря массы образцом	Количество цемента	Показатель жаростойкости пенобетона	
	$\delta x_1$	$\delta x_2$	$\delta x_3$	$\delta x_4$	$\delta x_5$	$\delta y_{ж. \text{ эксп.}}$	$\delta y_{ж. \text{ выч.}}$
1	-1,0	-1,0	-1,00	-1,00	1,0	-1,0	-0,8
2	-0,8	-0,9	-1,00	-1,00	0,8	-0,7	-0,6
3	-0,2	-0,6	0,33	-1,00	1,0	-0,3	-0,1
4	-0,8	-0,6	0,33	-1,00	0,6	-0,3	-0,3
5	-0,2	-0,6	-1,00	-0,64	0,6	-0,2	-0,3
6	-0,2	-0,1	-0,33	-0,64	0,6	0,0	-0,0
7	-0,8	-0,1	0,33	-1,00	0,6	0,0	-0,2
8	0,2	-0,1	-1,00	-0,28	0,6	0,3	0,0
9	0,5	-0,6	0,33	-0,64	-0,8	0,3	0,3
10	0,5	1,0	-0,33	-0,28	-1,0	0,5	0,7
11	0,2	0,5	-0,33	-0,64	-0,8	0,5	0,4
12	0,5	0,5	1,00	0,23	-0,8	0,7	0,7
13	0,2	-0,1	1,00	-0,28	-0,8	0,7	0,4
14	1,0	1,0	1,00	1,00	-0,6	1,0	1,1
15	1,0	0,7	1,00	0,23	-0,8	1,0	1,0

Уравнение регрессии для вычисления прогнозируемого значения жаростойкости пенобетона:

$$\delta y_{ж. \text{ выч.}} = 0,18 + 0,41 \cdot \delta x_1 + 0,28 \cdot \delta x_2 + 0,13 \cdot \delta x_3 + 0,02 \cdot \delta x_4 - 0,10 \cdot \delta x_5.$$

Критерий Фишера расчетный составит  $F_{расч} = 22,5180$ . Критерий Фишера табличный –  $F_{табл} = F(14, 9) = 3,0255$ . Поскольку расчетное значение больше табличного, т. е.  $F_{расч} > F_{табл}$ , следует заключить, что уравнение регрессии в целом значимо.

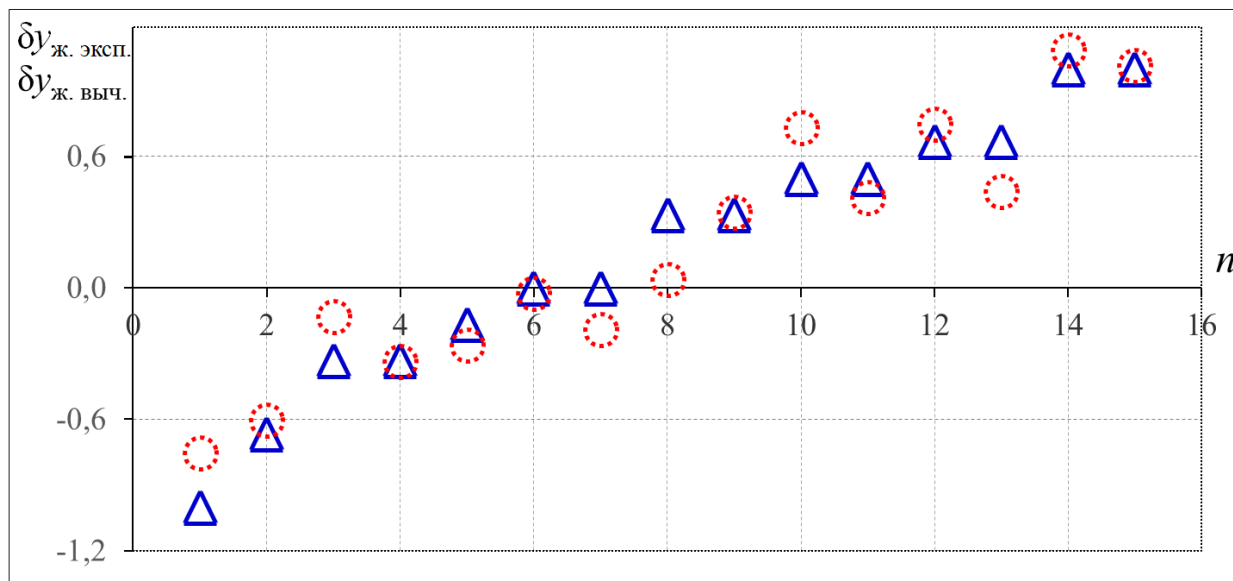


Рис. 1. Экспериментальные и вычисленные значения жаростойкости пенобетона:  $\Delta$  – экспериментальные значения,  $\delta y_{ж. \text{ эксп.}}$ ,  $\circ$  – вычисленные значения,  $\delta y_{ж. \text{ выч.}}$ ;  $n$  – количество экспериментов

Таблица 2

**Экспериментальное исследование морозостойкости пенобетона – марка пенобетона по морозостойкости F25**

№ п/п	Относительные единицы (безразмерные)										
	Количество фибры	Длина фибры	Диаметр расплыва	Температура пропарки	Взаимодействие факторов					Показатель морозостойкости пенобетона	
					$\delta x_5 = (\delta x_1)^2$	$\delta x_6 = (\delta x_3)^2$	$\delta x_7 = (\delta x_4)^2$	$\delta x_8 = \delta x_1 \cdot \delta x_2 \cdot \delta x_3 \cdot \delta x_4$	$\delta x_9 = (\delta x_1)^3$	$\delta y_{м. \text{ эксп.}}$	$\delta y_{м. \text{ выч.}}$
1	-0,3	-1,0	0,00	-1,0	-0,6	-0,1	-1,0	-0,8	-0,8	-1,0	-0,9
2	-1,0	1,0	-1,00	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,9	-1,0	-1,0	-0,9
3	0,3	-1,0	0,00	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,6	-0,2	-1,0	-0,7
4	-0,3	-1,0	-0,25	1,0	-0,6	-0,4	1,0	-0,8	-0,8	-1,0	-1,0
5	1,0	-1,0	0,25	1,0	1,0	0,1	1,0	-0,2	1,0	-1,0	-0,7
6	-1,0	-1,0	0,00	0,0	-1,0	-0,1	-0,1	-1,0	-1,0	-1,0	-0,8
7	1,0	1,0	-1,00	0,0	1,0	-1,0	-0,1	0,1	1,0	-1,0	-0,8
8	0,3	1,0	-0,25	-1,0	0,1	-0,4	-1,0	-0,1	-0,2	-1,0	-0,9
9	1,0	1,0	1,00	0,0	1,0	1,0	-0,1	1,0	1,0	1,0	0,8
10	1,0	-1,0	0,50	0,0	1,0	0,4	-0,1	-0,2	1,0	1,0	0,7
11	0,3	1,0	0,75	-1,0	0,1	0,7	-1,0	0,2	-0,2	1,0	0,9
12	0,3	-1,0	0,50	0,0	0,1	0,4	-0,1	-0,5	-0,2	1,0	0,5
13	-1,0	1,0	-0,25	1,0	-1,0	-0,4	1,0	-0,8	-1,0	1,0	0,7
14	-1,0	-1,0	0,75	1,0	-1,0	0,7	1,0	-0,9	-1,0	1,0	1,0
15	-0,3	1,0	-0,50	0,0	-0,6	-0,6	-0,1	-0,4	-0,8	1,0	1,0

Уравнение регрессии для вычисления значения показателя морозостойкости пенобетона:

$$\delta y_{м. \text{ выч.}} = - 2,22 + 17,16 \cdot \delta x_1 + 2,13 \cdot \delta x_2 - 3,24 \cdot \delta x_3 + 15,87 \cdot \delta x_4 - 32,56 \cdot \delta x_5 + 6,55 \cdot \delta x_6 - 15,33 \cdot \delta x_7 - 5,33 \cdot \delta x_8 + 17,46 \cdot \delta x_9.$$

Критерий Фишера расчетный составит  $F_{\text{расч}} = 21,3390$ . Критерий Фишера табличный –  $F_{\text{табл}} = F(14, 5) = 4,6358$ . Поскольку расчетное значение больше табличного, т. е.  $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$ , то следует заключить, что уравнение регрессии в целом значимо.

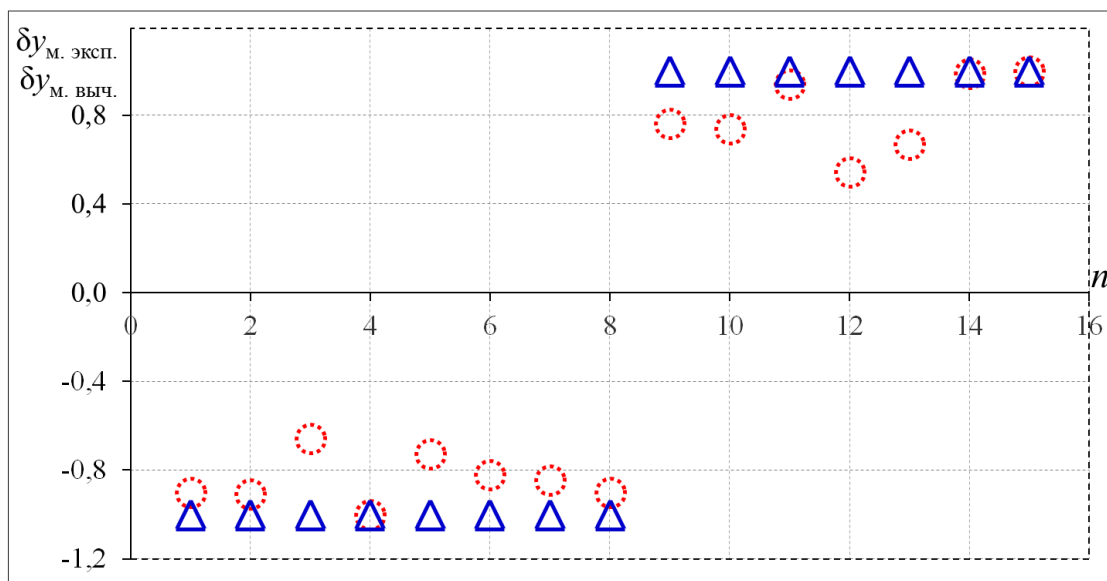


Рис. 2. Экспериментальные и вычисленные значения морозостойкости пенобетона:  
 $\triangle$  – экспериментальные значения,  $\delta y_{\text{м. эксп}}$ ;  $\odot$  – вычисленные значения,  $\delta y_{\text{м. выч}}$ ;  $n$  – количество экспериментов

При математической обработке экспериментальных данных по показателям прочности на сжатие и количества воздушных теплосмен было установлено, что подтвердить адекватность линейного уравнения регрессии не представляется возможным.

Имея в виду возможность гибкой настройки параметров для лучшего приближения данных, было принято решение искать уравнение регрессии в виде нелинейных моделей со стандартизованными коэффициентами (табл. 3 и 4):

– для показателя прочности на сжатие

$$\delta y_{\text{п. выч.}} = b_0 + b_1 \cdot \delta x_1 + b_2 \cdot \delta x_2 + b_3 \cdot \delta x_3 + b_4 \cdot \delta x_4 + b_5 \cdot \delta x_5 + b_6 \cdot \delta x_6 + b_7 \cdot \delta x_7 + b_8 \cdot \delta x_8 + \\ + b_9 \cdot \delta x_9 + b_{10} \cdot \delta x_{10} + b_{11} \cdot \delta x_{11} + b_{12} \cdot \delta x_{12} + b_{13} \cdot \delta x_{13},$$

где  $b_0 \dots b_{13}$  – коэффициенты регрессии;

$\delta x_1 \dots \delta x_5$  – влияющие факторы;

$\delta x_6 \dots \delta x_{13}$  – взаимодействие факторов:

$$\delta x_6 = (\delta x_1)^2, \delta x_7 = (\delta x_2)^2, \delta x_8 = (\delta x_3)^2, \delta x_9 = (\delta x_4)^2, \delta x_{10} = (\delta x_5)^2,$$

$$\delta x_{11} = \delta x_1 \cdot \delta x_2 \cdot \delta x_3 \cdot \delta x_4 \cdot \delta x_5, \delta x_{12} = \delta x_2 \cdot \delta x_4, \delta x_{13} = (\delta x_1)^3;$$

– для показателя количества воздушных теплосмен

$$\delta y_{\text{кт. выч.}} = b_0 + b_1 \cdot \delta x_1 + b_2 \cdot \delta x_2 + b_3 \cdot \delta x_3 + b_4 \cdot \delta x_4 + b_5 \cdot \delta x_5 + b_6 \cdot \delta x_6 + b_7 \cdot \delta x_7 + b_8 \cdot \delta x_8 + \\ + b_9 \cdot \delta x_9 + b_{10} \cdot \delta x_{10},$$

где  $b_0 \dots b_{13}$  – коэффициенты регрессии;

$\delta x_1 \dots \delta x_5$  – влияющие факторы;

$\delta x_6 \dots \delta x_{10}$  – взаимодействие факторов:

$$\delta x_6 = (\delta x_1)^2, \delta x_7 = \delta x_3 \cdot \delta x_4, \delta x_8 = \delta x_2 \cdot \delta x_4, \delta x_9 = \delta x_1 \cdot \delta x_5, \delta x_{10} = \delta x_1 \cdot \delta x_3.$$

Уравнение регрессии для вычисления прогнозируемого значения прочности пенобетона на сжатие имеет вид

$$\delta y_{п. выч} = 1,77 + 17,97 \cdot \delta x_1 - 6,51 \cdot \delta x_2 + 27,15 \cdot \delta x_3 - 16,80 \cdot \delta x_4 - 8,68 \cdot \delta x_5 - 41,00 \cdot \delta x_6 + 2,76 \cdot \delta x_7 - 28,01 \cdot \delta x_8 + 14,83 \cdot \delta x_9 + 9,96 \cdot \delta x_{10} + 6,62 \cdot \delta x_{11} + 2,05 \cdot \delta x_{12} + 20,89 \cdot \delta x_{13}.$$

Критерий Фишера расчетный составит  $F_{расч} = 968,1269$ . Критерий Фишера табличный –  $F_{табл} = F(14, 1) = 245,3640$ . Поскольку расчетное значение больше табличного, т. е.  $F_{расч} > F_{табл}$ , то следует заключить, что уравнение регрессии в целом значимо

Таблица 3

**Экспериментальное исследование прочности пенобетона на сжатие**

№ п/п	Относительные единицы (безразмерные)														Показатель прочности на сжатие	
	Количество тонкомолой добавки	Количество фибры	Диаметр распыля	Температура пропарки	Количество цемента	Взаимодействие факторов										
						$\delta x_1$	$\delta x_2$	$\delta x_3$	$\delta x_4$	$\delta x_5$	$\delta x_6 = (\delta x_1)^2$	$\delta x_7 = (\delta x_2)^2$	$\delta x_8 = (\delta x_3)^2$	$\delta x_9 = (\delta x_4)^2$	$\delta x_{10} = (\delta x_5)^2$	$\delta x_{11} = \delta x_1 \cdot \delta x_2 \cdot \delta x_3 \cdot \delta x_4 \cdot \delta x_5$
1	-1,0	-1,0	-0,2	0,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,3	-0,1	-1,0	-1,0	-0,9	-1,0	-1,0	-0,99	
2	-1,0	-0,3	-0,6	1,0	0,6	-1,0	-0,6	-0,6	1,0	0,6	-0,8	-0,2	-1,0	-1,0	-1,00	
3	-0,2	1,0	1,0	1,0	-1,0	-0,4	1,0	1,0	1,0	-1,0	0,3	1,0	-0,6	-0,9	-0,91	
4	-0,8	1,0	-1,0	-1,0	-0,8	-0,9	1,0	-1,0	-1,0	-0,8	-0,6	0,4	-0,9	-0,8	-0,82	
5	0,5	-1,0	0,2	-1,0	-1,0	0,3	-1,0	0,1	-1,0	-1,0	-0,8	-1,0	0,2	-0,7	-0,66	
6	0,2	-0,3	0,6	0,0	0,6	-0,1	-0,6	0,6	-0,1	0,6	-0,3	-0,4	-0,3	-0,2	-0,16	
7	1,0	0,3	-0,6	-1,0	-0,8	1,0	0,1	-0,6	-1,0	-0,8	0,0	0,0	1,0	0,0	0,01	
8	-0,8	1,0	0,6	-1,0	-0,8	-0,9	1,0	0,6	-1,0	-0,8	-0,4	0,4	-0,9	0,1	0,08	
9	0,5	0,3	-0,2	-1,0	-1,0	0,3	0,1	-0,3	-1,0	-1,0	-0,2	0,0	0,2	0,1	0,13	
10	-0,8	0,3	-0,6	1,0	0,6	-0,9	0,1	-0,6	1,0	0,6	-0,5	0,4	-0,9	0,2	0,17	
11	-1,0	1,0	-0,2	0,0	0,6	-1,0	1,0	-0,3	-0,1	0,6	-0,5	0,7	-1,0	0,2	0,18	
12	0,2	-0,3	0,2	1,0	0,6	-0,1	-0,6	0,1	1,0	0,6	-0,2	-0,2	-0,3	0,4	0,43	
13	-0,2	-1,0	-1,0	0,0	1,0	-0,4	-1,0	-1,0	-0,1	1,0	-0,9	-0,9	-0,6	0,5	0,50	
14	-1,0	-0,3	1,0	-1,0	1,0	-1,0	-0,6	1,0	-1,0	1,0	-0,8	-0,5	-1,0	0,6	0,59	
15	1,0	1,0	1,0	0,0	-0,8	1,0	1,0	1,0	-0,1	-0,8	1,0	0,7	1,0	1,0	1,00	

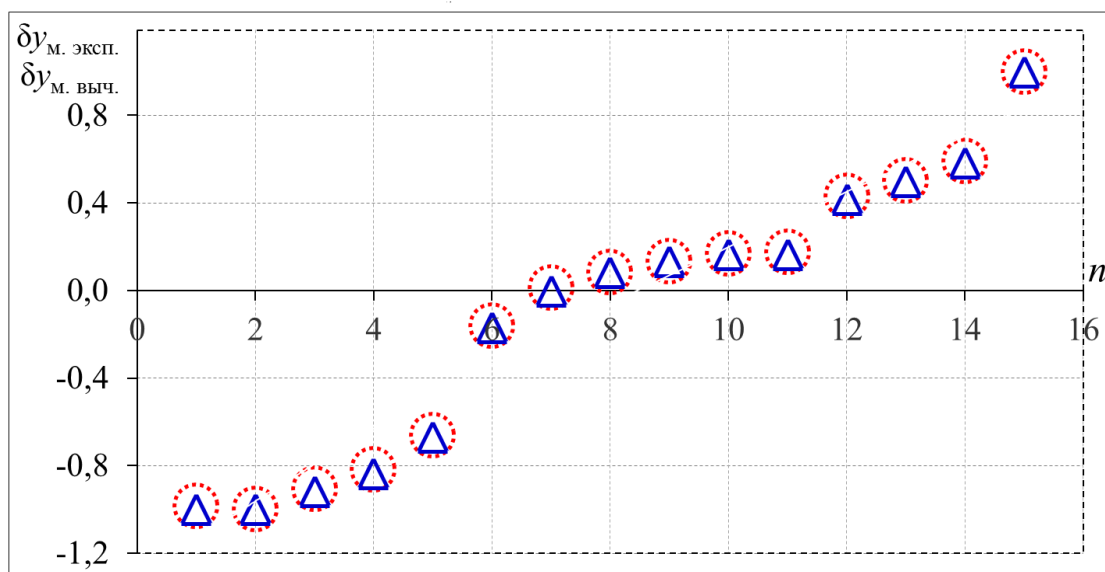


Рис. 3. Экспериментальные и вычисленные значения прочности пенобетона на сжатие:  $\Delta$  – экспериментальные значения,  $\delta y_{п. эксп.}$ ;  $\circ$  – вычисленные значения,  $\delta y_{п. выч.}$ ;  $n$  – количество экспериментов

Таблица 4

## Экспериментальное исследование пенобетона на количество воздушных теплосмен

№ п/п	Относительные единицы (безразмерные)											Количество воздушных теплосмен	
	Количество тонкомолотой добавки	Удельная поверхность добавки	Количество фибры	Количество цемента	Общая потеря массы образцом	Взаимодействие факторов					$\delta y_{\text{кт. эксп.}}$		
						$\delta x_6 = (\delta x_1)^2$	$\delta x_7 = \delta x_3 \cdot \delta x_4$	$\delta x_8 = \delta x_2 \cdot \delta x_4$	$\delta x_9 = \delta x_1 \cdot \delta x_5$	$\delta x_{10} = \delta x_1 \cdot \delta x_3$			
1	0,3	-0,1	-0,33	-1,0	0,2	-0,1	-0,4	-0,3	0,2	-0,4	-1,0	-0,86	
2	-1,0	0,7	0,33	0,6	-1,0	-1,0	0,7	0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,00	
3	0,8	-1,0	-1,00	0,6	-1,0	0,7	-0,9	-0,8	0,5	-0,6	-1,0	-0,85	
4	0,8	-0,7	-1,00	0,6	-0,3	0,7	-0,9	-0,5	0,6	-0,6	-0,6	-0,66	
5	0,6	-0,7	-0,33	1,0	-0,3	0,3	-0,1	-0,5	0,4	-0,2	-0,6	-0,71	
6	0,3	0,7	-0,33	1,0	-0,6	-0,1	-0,1	1,0	0,1	-0,4	-0,2	-0,25	
7	0,6	-1,0	-1,00	-0,8	-0,6	0,3	-1,0	-1,0	0,4	-0,6	-0,2	-0,42	
8	0,3	0,7	0,33	-1,0	-1,0	-0,1	0,3	0,4	0,1	0,0	-0,2	-0,18	
9	0,6	0,4	-0,33	0,6	-1,0	0,3	-0,1	0,6	0,3	-0,2	0,2	0,10	
10	0,3	-0,1	0,33	1,0	-0,6	-0,1	0,8	0,1	0,1	0,0	0,2	0,16	
11	0,8	-0,1	0,33	-1,0	-0,6	0,7	0,3	-0,3	0,5	0,3	0,6	0,59	
12	0,6	-0,7	0,33	-0,8	-1,0	0,3	0,3	-0,8	0,3	0,2	0,6	0,48	
13	0,8	0,4	-0,33	0,6	-0,3	0,7	-0,1	0,6	0,6	-0,1	0,6	0,51	
14	1,0	1,0	1,00	-0,8	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	1,00	
15	0,8	1,0	1,00	-1,0	0,2	0,7	0,9	0,6	0,7	0,8	1,0	0,58	

Критерий Фишера расчетный составит  $F_{\text{расч}} = 968,1269$ . Критерий Фишера табличный –  $F_{\text{табл}} = F(14, 1) = 245,3640$ . Поскольку расчетное значение больше табличного, т. е.  $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$ , то следует заключить, что уравнение регрессии в целом значимо.

Уравнение регрессии для вычисления прогнозируемого значения количества воздушных теплосмен имеет вид

$$\delta y_{\text{кт. выч}} = -2,84 - 0,36 \cdot \delta x_1 - 4,92 \cdot \delta x_2 + 0,69 \cdot \delta x_3 - 1,75 \cdot \delta x_4 - 0,94 \cdot \delta x_5 - 0,17 \cdot \delta x_6 + 2,53 \cdot \delta x_7 + 5,62 \cdot \delta x_8 + 5,79 \cdot \delta x_9 - 3,88 \cdot \delta x_{10}.$$

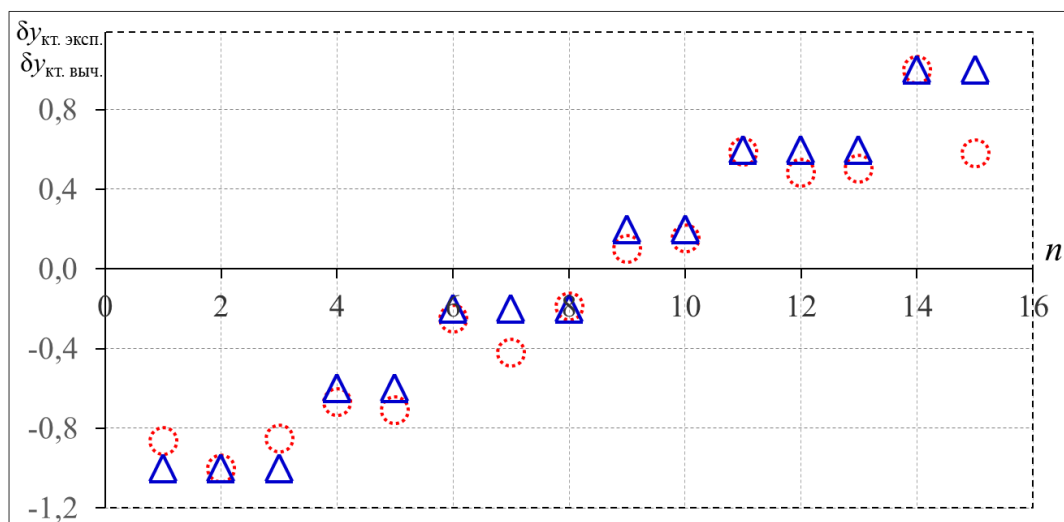


Рис. 4. Экспериментальные и вычисленные значения количества воздушных теплосмен:

$\triangle$  – экспериментальные значения,  $\delta y_{\text{кт. эксп.}}$ ;  $\circ$  – вычисленные значения,  $\delta y_{\text{кт. выч.}}$ ;  $n$  – количество экспериментов



Критерий Фишера расчетный составит  $F_{\text{расч}} = 12,2956$ . Критерий Фишера табличный –  $F_{\text{табл}} = F(14,4) = 5,8733$ . Поскольку расчетное значение больше табличного, т. е.  $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$ , следует заключить, что уравнение регрессии в целом значимо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки экспериментальных данных впервые получены значимые математические модели (уравнения регрессии), адекватно описывающие влияние факторов процесса получения жаростойкого пенобетона на формирование его свойств, что имеет существенное значение при прогнозировании свойств вновь разрабатываемых составов жаростойкого пенобетона. При этом необходимо отметить следующее.

На класс по предельно допустимой температуре применения (жаростойкость) и количество воздушных теплосмен разработанного состава пенобетона непосредственно влияют количество тонкомолотой добавки, не превышающее 25% по массе цемента, а также ее удельная поверхность ( $12000 \text{ см}^2/\text{г}$ ): чем больше значения указанных факторов, тем выше жаростойкие свойства материала и, соответственно, выше количество воздушных теплосмен. Кроме этого, значительное влияние на данные свойства пенобетона оказывает фиброволокно, максимальное количество которого в составе в размере 2% по массе цемента обуславливает формирование высоких качественных характеристик указанных ранее свойств. Тенденция снижения количества цемента в расчете на  $1 \text{ м}^3$ , вплоть до значений  $420 \text{ кг}/\text{м}^3$ , усиливает жаростойкие свойства пенобетона.

На морозостойкие свойства пенобетона положительное воздействие оказывает увеличение количества фиброволокна и его длины. Вместе с тем на повышение марки пенобетона по морозостойкости влияют реология и условия его твердения. Важным показателем реологических свойств является распыл по Суттарду, который не должен снижаться до значений менее 16 см. При этом повышение значения данного показателя до 20 см усиливает морозостойкие свойства пенобетона. Температурно-влажностное твердение пенобетона при температуре, близкой к  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , повышает его прочность, что обусловлено повышением скорости гидратации цементного камня, непосредственно влияющей на прочность при сжатии и, как следствие, на марку по морозостойкости.

## Список используемых источников

1. Гула Д. Н. Анализ возможных схемных решений закрепления листов металлооблицовки нулевой отметки стартового сооружения универсального стартового комплекса «Ангара» // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 1, ч. 1. – С. 44–49. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28307272> (дата обращения: 25.05.2023).
2. Иванков С., Гончарук А., Коваль С. Разработка нормативно-методических документов по расчету и эксплуатационному контролю несущих сооружений стартовых космических комплексов : научно-техн. отчет. – М., 2000. – 231 с.
3. Математическое описание синтеза неавтоклавного пенобетона на основе полимеров с заданными физико-механическими характеристиками / А. М. Сычева [и др.] // Современные направления в строительстве и эксплуатации зданий и сооружений : сб. науч. тр. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – Вып. 2. – С. 26–34.
4. Алешичев С.Е., Балюбаш В.А., Стегаличев Ю.Г. Технологический анализ и моделирование многоканальных технологических комплексов : учеб. пособие. – СПб. : Ун-т ИТМО, 2016. – 121 с.

О. В. Гончаров<sup>1</sup>;

Б. Д. Казахов<sup>2</sup>,

*доктор военных наук, профессор;*

К. Б. Салтыков<sup>2</sup>,

*кандидат военных наук*

<sup>1</sup>Военная академия Генерального штаба ВС РФ, г. Москва.

<sup>2</sup>ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ И ВНЕДРЕНИЮ ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА В ПРАКТИКУ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Представлены методические подходы к реализации процедур изучения и внедрения опыта выполнения задач по предназначению организационно-техническими системами военного назначения. Сформированы признаки, на основании которых осуществляется определение передового опыта. Предлагаются последовательность (процедура) работы по изучению опыта и рекомендации по его внедрению (освоению) в практику деятельности организационно-технических систем военного назначения.

Ключевые слова: опыт выполнения задач, признаки передового опыта, процедуры изучения и внедрения передового опыта.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие военного искусства на сегодняшний день находится на переломном этапе. Высокая динамичность и большой пространственный размах современных боевых действий, огромная разрушительная мощь и разнообразие применяемого сторонами оружия значительно усложнили содержание задач, решаемых войсками (силами). В этих условиях при изучении объектов и процессов военной деятельности реализация заинтересованными специалистами исключительно процедур моделирования и даже натуральных экспериментов не позволяет получать результаты, которые характеризовались бы как целостные, обобщающие и надежные. И здесь на помощь военным теоретикам и практикам, для более точного оценивания и прогнозирования последствий и итогов выполнения боевых (учебно-боевых) задач воинскими формированиями различного целевого предназначения и различного уровня войсковой иерархии, могут прийти научно обоснованные алгоритмы изучения (осмысления) уже имеющегося опыта действий войск (сил). Осуществление этого изучения в рамках научного анализа определяет справедливость утверждения, что данному процессу должны быть свойственны соответствующие методические основы.

Вместе с тем следует признать, что к настоящему времени разработка методических аспектов подготовки и осуществления таких сложных и многоплановых процедур, как изучение и внедрение передового опыта в практику деятельности организационно-технических систем военного назначения (ОТС ВН) не может считаться завершенной. Несмотря на разнообразие и многочисленность теоретических проработок, у соответствующих специалистов нет единого понимания, какими методическими подходами следует руководствоваться при реализации перечисленных процедур применительно к воинским формированиям в ходе решения боевых (учебно-боевых) задач.

Смысл всего вышеизложенного нацеливает нас на решение актуальной научной задачи, заключающейся в совершенствовании методических подходов к изучению и внедрению передового опыта в практику деятельности ОТС ВН. Надо условиться о том, что при решении сформулированной задачи под анализируемыми системами будем понимать воинские фор-

мирования различного уровня иерархии, а также коллективы должностных лиц в составе органов военного управления (органов управления).

## ОСНОВЫ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ИЗУЧЕНИЮ И ВНЕДРЕНИЮ ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА В ПРАКТИКУ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТС ВН

*Передовой опыт* – один из самых доступных в практике источников новых идей, подходов и технологий. Поэтому предполагается целесообразным выявлять способы действий ОТС ВН, при реализации которых достигается более эффективное их применение, осуществлять, опираясь на передовой опыт, выполнение ими задач по предназначению в различных условиях обстановки.

Успешность заимствования интересующего опыта возможна только в результате проявления ответственными за его изучение и внедрение должностными лицами творческого подхода при реализации ряда процедур (рис. 1).

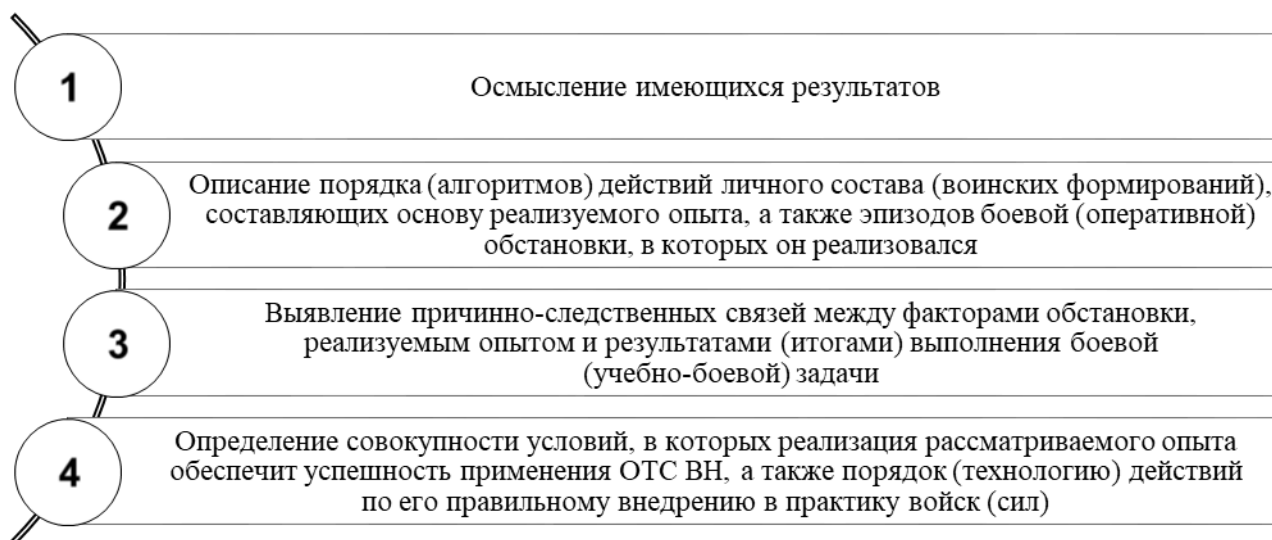


Рис. 1. Процедуры изучения опыта выполнения задач по предназначению

Совокупность перечисленных процедур, подлежащих выполнению, позволяет вполне правомерно заключить, что процесс изучения и внедрения передового опыта в деятельность ОТС ВН является самостоятельной научной задачей, решаемой с использованием специфических методических подходов.

Авторы статьи считают, что научное изучение, анализ и обобщение опыта следует направить на достижение следующих исследовательских целей:

- 1) установление существующего уровня решения задач по обучению личного состава (воинских формирований) использованию образцов вооружения и военной техники, способам действий и другим компонентам своего функционирования, составляющим содержательную основу внедряемого передового опыта;
- 2) определение проблемных вопросов, характерных для внедрения передового опыта;
- 3) изучение доступности и результативности рекомендаций, реализация которых предполагает повышение эффективности внедрения передового опыта;
- 4) поиск и обоснование новых рациональных подходов (методик) по выявлению, изучению и внедрению передового опыта.

Следует заметить, что, изучая функционирование сложных ОТС ВН, исследователи свои устремления могут нацелить на анализ различных видов опыта (рис. 2).

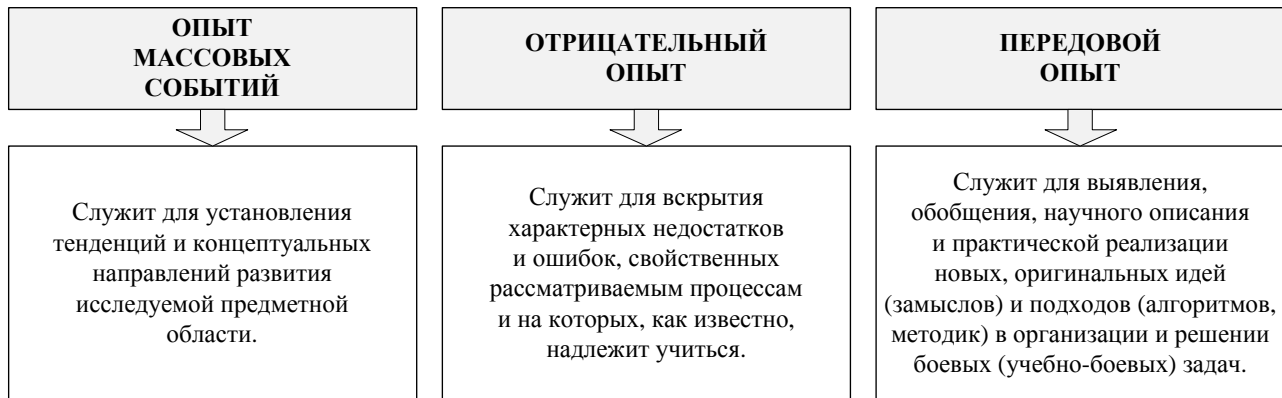


Рис. 2. Классификация опыта, подлежащего анализу

Учитывая направленность настоящей статьи, из всех видов опыта, представленных на рис. 2, сосредоточим свое внимание на осмыслении методических подходов к изучению передового опыта применения ОТС ВН и к выработке предложений по его внедрению в деятельность воинских коллективов. Это обусловлено тем, что в сути передового опыта отражаются все проблемные вопросы, которые наиболее актуальны для практики и в большей мере сковывают ее развитие. Кроме того, на основе передового опыта формируются предложения по совершенствованию различных сторон деятельности войск (сил), а значит, его положения определяют направленность необходимых изменений в данной предметной области.

Важность изучения и внедрения передового опыта в практику деятельности ОТС ВН также обусловлена тем, что история вооруженной борьбы изобилует примерами, когда теория военного искусства не всегда своевременно отвечала потребностям войск (сил) на поле боя. Данное отставание нивелировалось задействованием опыта «мастеров» и «новаторов» военного дела, а его широкое применение дальновидными командирами (командующими, начальниками) всегда рассматривалось как наиболее оперативный подход к решению острых прикладных вопросов. Опыт успешного решения задач сослуживцами отличается наглядностью, его легче заимствовать при горизонтальном взаимодействии друг с другом. При этом, ввиду большей функциональности, очевидности и воспринимаемости, позитивные примеры действий соседних воинских формирований (должностных лиц) легче распространять среди других коллективов (военнослужащих).

Не умаляя достоинств рекомендаций и предложений, формируемых в ходе исключительно научных исследований, следует признать, что эти положения научной работы, как правило, носят комплексный характер. Для их получения необходимо затратить значительный временной ресурс, и зачастую их реализация требует очень глубоких преобразований (трансформаций). По указанным причинам и в силу ряда других причин они лучше внедряются в массовую практику, будучи освоенными сначала в процессе передового опыта.

Квалифицируя определенный опыт действий ОТС ВН как передовой, надлежит понимать, что такой тип опыта не только противопоставляется отрицательному, но и по качественным характеристикам не совпадает полностью с наиболее близким ему опытом – положительным.

Основу осуществления положительного опыта составляет реализация традиционных подходов в подготовке и выполнении боевых (учебно-боевых) задач, что позволяет для определенных условий обстановки получать результаты, соответствующие нормативным показателям (требованиям), содержащимся в боевых уставах и наставлениях, а также в различных инструкциях и руководствах. Содержательную основу такого опыта составляют действия (алгоритмы) отдельных должностных лиц или воинских коллективов, хорошо зарекомендовавшие себя ранее, а также соответствующие итогам решения задач или незначительно превышающие такие итоги. Эти действия характерны для массовой практики.

*Передовой опыт* – это совокупность знаний и практически усвоенных навыков (умений), приобретенных отдельными военнослужащими или воинскими коллективами в ходе решения боевых (учебно-боевых) задач и основанных на подходах (идеях), реализации которых свойственны следующие признаки: новизна в порядке и последовательности действий, другой состав привлекаемых сил и средств; достижение установленных (назначенных) результатов в конкретных условиях и ситуациях [1].

Для изучения и распространения передового опыта в практической деятельности военнослужащих и воинских коллективов сделано немало. Однако в данной предметной области остается еще ряд проблемных вопросов, и, прежде всего, это отсутствие единых методических положений, обеспечивающих решение вопросов, представленных на рис. 3.

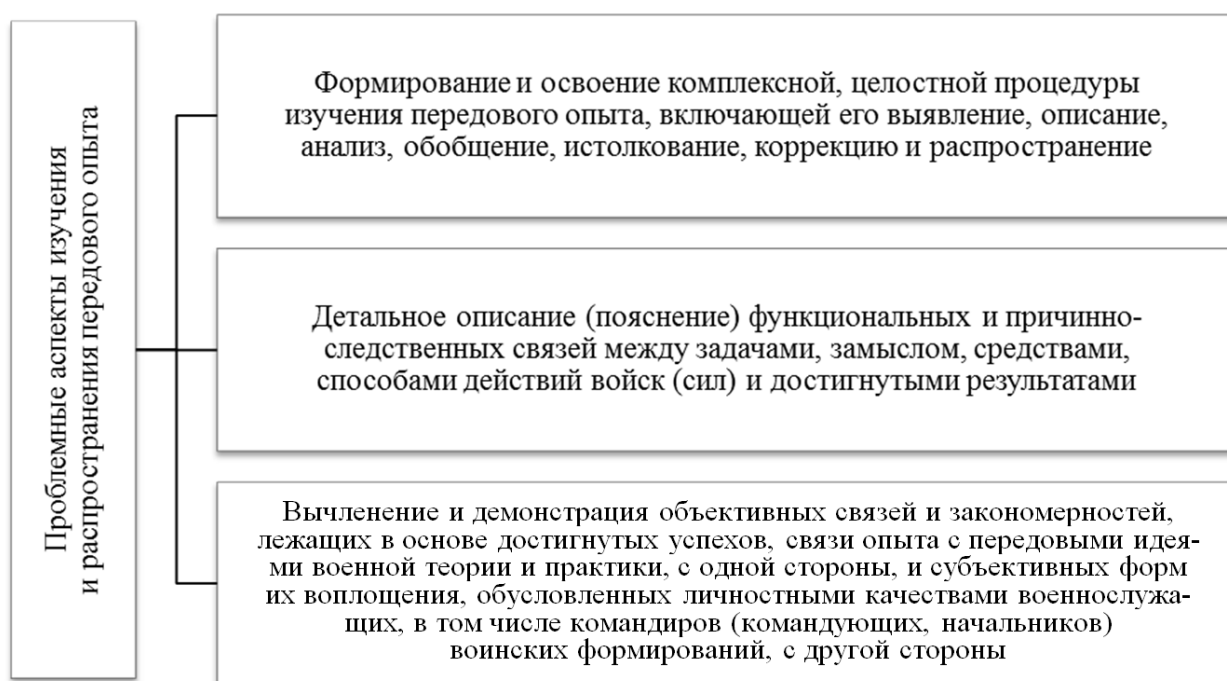


Рис. 3. Проблемные аспекты изучения и распространения передового опыта

Отсутствие соответствующих методических положений в рассматриваемой предметной области определяет ситуацию, для которой характерны описание и распространение отдельных внешних атрибутов, в лучшем случае – отдельных фрагментов боевой (учебно-боевой) деятельности. При этом не представляется возможным сформировать прорывные идеи и передовую целостную систему действий войск (сил).

Какими же положениями следует руководствоваться при нивелировании или устранении отмеченных недостатков в области деятельности, охватывающей процессы организации, выявления, анализа и внедрения передового опыта? Перечислим их ниже.

*Во-первых*, эти положения должны быть в полной мере описаны и объяснены соответствующей теорией и верифицированы практикой применения войск (сил).

*Во-вторых*, распространению и внедрению подлежит не жесткая последовательность действий, составляющих основу опыта, хорошо себя зарекомендовавшего в определенных условиях обстановки, а прежде всего – извлеченные из него идеи и мысли. Такие идеи (замыслы), грамотно сформулированные, являются теоретической базой для органичного формирования набора приемов и методов (как содержательной основы передового опыта), которые в последующем надлежит использовать творчески с учетом принципов военного искусства, накопленных знаний и уже усвоенных навыков (компетенций), актуальных условий обста-

новки и даже традиций боевой (учебно-боевой) деятельности, сложившихся в воинских коллективах.

*В-третьих*, необходима реализация комплексного подхода при изучении и внедрении передового опыта, с учетом потребности конкретных исполнителей (субъектов, перенимающих и воплощающих опыт), уровня их оснащения и подготовки; перечня и содержания задач, стоящих перед ними; других важных условий обстановки. Заимствование исполнителями передового опыта как определенной технологии (структурированной системы действий) должно осуществляться только в случае его пригодности для сложившихся условий.

Вместе с тем приемы (алгоритмы), применимые впервые, или отдельные (локальные) корректировки в порядке и последовательности функционирования ОТС ВН должны органично вписываться в сложившуюся совокупность действий элементов этой системы, усиливать и совершенствовать ее. Если частные усовершенствования не обеспечивают достижения требуемой результативности, то необходимо своевременно признавать, что корректируемая система действий является малоэффективной и подлежит замене. В этом случае речь идет о насущной потребности формирования другой (новой) целостной системы выполнения боевых (учебно-боевых) задач, которая логически обоснована, охватывает цели, функциональное наполнение (содержание) деятельности ОТС ВН в рамках определенной формы их применения, а также состав привлекаемых при этом сил и средств.

*В-четвертых*, должного эффекта от внедрения передового опыта следует ожидать тогда, когда эта работа сопровождается стимулированием творческой деятельности командиров (командующих, начальников) и личного состава воинских формирований, нацеленной на индивидуальный и коллективный поиск более результативных способов выполнения задачи, всестороннюю оценку последствий их реализации, вынашивание и выработку своих (авторских) вариантов поведения в боевой (учебно-боевой) обстановке.

*В-пятых*, успешность изучения и внедрения опыта возможна только в том случае, если эти процессы будут базироваться на эффективных концепциях обучения войск (сил) и воспитания личного состава. Эта успешность во многом определяется уровнем методического мастерства командиров (командующих, начальников), организующих мероприятия оперативной и боевой подготовки и непосредственно руководящих ими или управляющих воинскими коллективами непосредственно в ходе выполнения боевых задач. Данные должностные лица обязаны адекватно понимать реальные потребности подчиненных ОТС ВН и объективно оценивать их готовность к восприятию и творческой переработке внедряемого опыта.

Следует помнить, что понятие «передовой опыт» обладает как абсолютным, так и относительным смыслом. Эта относительность объясняется тем фактом, что рациональные способы выполнения боевых (учебно-боевых) задач, освоенные одним воинским коллективом и реализуемые уже длительное время, могут быть новаторскими и передовыми для другого. Кроме того, при внедрении передового опыта надлежит учитывать уровень готовности ОТС ВН к восприятию передаваемого опыта и прогнозировать соответствующие последствия в зависимости от объема и сложности осваиваемых новых подходов (алгоритмов). Если необходимо, внедрение опыта должно осуществляться поэтапно и вариативно при дифференцировании цели обращения к опыту.

В зависимости от обстановки цели личного состава (воинского коллектива) могут быть дифференцированы в следующем порядке:

- 1) вызывание интереса на заимствование идеи опыта;
- 2) мотивация на осмысление сути и содержания передового опыта;
- 3) формирование глубокой убежденности в объективной необходимости обязательно использовать в служебной практике или отдельные элементы опыта, или в комплексе осуществлять последовательность действий, составляющих содержание опыта и т. д.

В зависимости от степени уникальности и последствий внедрения, в структуре передового опыта можно условно конфигурировать по двум типам: новаторский опыт и опыт модифицирующий. Параметры, разделяющие эти типы опытов, представлены на рис. 4.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ (ПРОЦЕДУРА) РАБОТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ОПЫТА

Теперь определимся с отличительными чертами, которые отделяют истинно передовой опыт от других видов опыта, в том числе положительного, но традиционного. Проведем анализ сущности и понимания этих признаков.

НОВАТОРСКИЙ ОПЫТ	ОПЫТ МОДИФИЦИРУЮЩИЙ
Совокупность полученных знаний и наработанных умений, формирующих целостную систему действий, обладающую существенными элементами новизны	Характерен для совокупности методов (технологий), содержащей менее выраженные, менее оригинальные элементы нового. Он построен на серьезном усовершенствовании, развитии существующих способов и подходов к выполнению поставленных задач, однако полезен и относительно легче распространяется.

Рис. 4. Типология передового опыта по степени новизны

1. *Актуальность и перспективность, соответствие тенденциям, которые в большей мере проявляются в военном искусстве, а также уровню развития вооружения и военной техники (средств вооруженной борьбы).* Наличие перечисленных признаков свидетельствует о нацеленности передового опыта на разрешение как уже сформировавшихся проблем практики, так и тех, которые прогнозируются в будущем. Эта нацеленность на перспективу позволяет конструктивно решать задачи, связанные с повышением возможностей войск (сил) совершенствовать способы и методы их действий, с развитием форм и методов оперативной (боевой) подготовки.

2. *Новизна, свойственная целевым установкам, содержанию способов подготовки к выполнению задач и порядку действий при их решении, а также применяемым (используемым) средствам вооруженной борьбы.* Проявление этого признака может быть различным: внесение новых положений в военную теорию, уставные и нормативно-правовые документы, регламентирующие вопросы подготовки и выполнения боевых (учебно-боевых) задач; непосредственная реализация войсками (силами) передовых способов применения в ходе своей практической деятельности.

3. *Соответствие законам и закономерностям вооруженной борьбы и принципам военного искусства.* Подлинно передовой опыт, значимые положительные сдвиги в развитии деятельности войск (сил) могут быть реализуемы и достигнуты только на основе их базирования и соответствия перечисленным категориям военного искусства. Конечно, эти основополагающие категории сами могут меняться (корректироваться, совершенствоваться) и дополняться новыми составляющими. Но указанным изменениям свойственна определенная инерционность и отсутствие высокой динамики. Пренебрежение должным учетом или его отсутствие в отношении ведущих положений военного искусства не позволят выявлять истинно передовой опыт действий войск (сил). В данной ситуации в рассматриваемой области будут формироваться фрагментарные результаты, обуславливающие наличие у должностных лиц не вполне целостных знаний, а войска (силы) не будут наделены навыками действий, которые адекватны сложившейся обстановке. В лучшем случае это приведет к псевдоуспеху, не отражающему реальной ситуации, и к нестабильным результатам, а в худшем – к поражению на поле боя, к большим (неоправданным) потерям и срыву выполнения боевой задачи.

4. *Устойчивость, стабильность положительных результатов.* Наличие этих признаков определяет, что последствия от внедрения передового опыта должны быть весомы и должны выражаться в значительном повышении уровня адаптации войск (сил) к динамичным изме-

нениям в оперативной (боевой) обстановке, обученности и слаженности воинских формирований, а также в снижении потерь (неоправданного расхода ресурсов) и т. д. Стабильность опыта выражается в том, что при его реализации различными воинскими формированиями на протяжении достаточно длительного времени устойчиво проявляется факт достижения ожидаемого (требуемого) эффекта, даже при некотором изменении условий.

5. *Применимость опыта должностными лицами или воинскими формированиями в других условиях (сходных с условиями, в которых первоначально реализовывался опыт)*. Сущность и содержание передового опыта, вырабатываемого вследствие творческой деятельности, во многом обусловлены личностями отдельных военнослужащих или традициями воинских коллективов, являющихся его формирователями. Достоинство истинно передового опыта проявляется в том, что на основе соответствующего анализа можно выделить составные части (замысел реализации, порядок, последовательность и длительность выполнения определенных функций, состав привлекаемых сил и средств и т. д.), которые можно условно «отделить» от его формирователей (создателей) и которые могут быть воспроизведены другими субъектами военной деятельности.

6. *Рациональный расход имеющихся ресурсов и отсутствие увеличения временных затрат на решение боевых (учебно-боевых) задач*. Если внедряемый опыт предполагает достижение положительных результатов за счет привлечения значительно большего количества сил и средств, повышения расхода материальных запасов и ресурса вооружения, возрастания потерь среди личного состава, а также существенного увеличения сроков выполнения, то такому опыту не надлежит присваивать категорию «передовой».

7. *Рациональность последствий интеграции опыта в целостный процесс выполнения согласованных боевых (учебно-боевых) мероприятий*. Данный признак определяет то обстоятельство, что внедрение опыта реализации определенной боевой (оперативной) задачи в уже действующую систему действий не должно приводить к тому, что результативность решения другой (других) задачи (задач) снизится. Предполагаемое внедрение нацелено на другое следствие – повышение итогов выполнения как отдельных мероприятий, так и эффективности действий ОТС ВН в целом. Для более ясного понимания этой мысли авторов приведем следующий пример. В условиях, когда противник способен вести огонь высокой плотности и оперативно переносить его на другие цели, не стоит внедрять опыт, предусматривающий повышение маневренности действий войск (сил) исключительно за счет снижения их защищенности. При этом вполне возможно, что в другой боевой ситуации отдание предпочтения маневренности войск за счет снижения их защищенности могло бы привести к успешному достижению целей боя (операции).

Использование признаков, которые мы рассмотрели ранее, позволяет осуществлять комплексное оценивание опыта и в случае должного соответствия – квалифицировать имеющиеся знания и освоенные навыки как передовые. Эти же признаки могут быть использованы частично или неполно при решении задачи, связанной с определением тех объектов и субъектов, которые могут стать основой для генерации другого (последующего) передового опыта.

Ввиду очевидной насыщенности и сложности работы, связанной с изучением опыта, предпочтительно ее осуществлять последовательно в рамках четырех этапов, которые представлены на рис. 5 [2].

В ходе I этапа осуществляется выявление системы действий, которую мы гипотетически относим к передовому опыту. Эта совокупность действий подвергается первичному анализу, и в случае ее сопровождения приведенными ранее в статье признаками она квалифицируется именно как передовой опыт.

На II этапе проводится описание явлений (процедур, процессов), формирующих содержание опыта. Решение данной задачи проводится с соблюдением следующих условий: сохранения последовательности реализации анализируемых явлений; опоры на накопленный фактический материал, который систематизирован в отчетных боевых документах (бюллетени, сборники боевых примеров и т. д.).



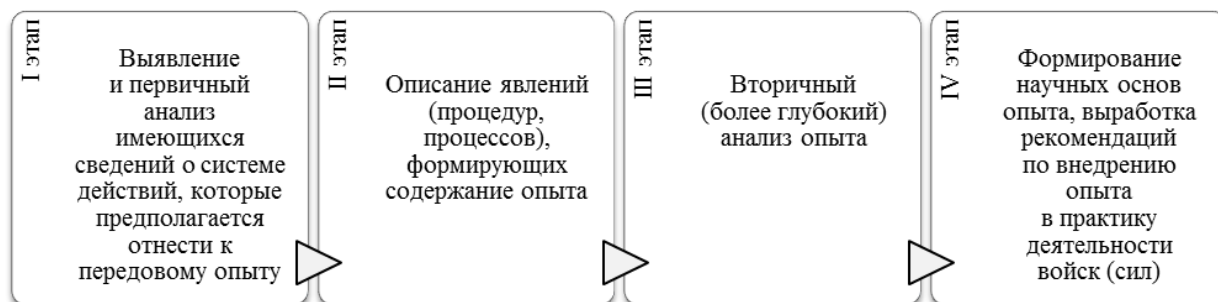


Рис. 5. Последовательность (процедура) работы по изучению опыта

Описание, основанное на имеющемся фактическом материале (совокупности фактов), исключает появление ошибочных мнений, обуславливаемых внешними впечатлениями реализаторов опыта, повышает объективность получаемых результатов. Поэтому очень важно проводить работу по своевременной систематизации и отражению опыта в отчетных боевых документах, для чего соответствующее внимание должно уделяться фиксированию получаемых результатов в ходе боя (операции), изучению боевых донесений (отзывов и отчетов по итогам эксплуатации вооружения и военной техники). Важнейшими источниками для интересующего нас фактологического материала могут стать доклады и выступления на сборах (конференциях, собраниях, совещаниях), предложения личного состава, получаемые по итогам проведения опроса по завершении выполнения боевых (учебно-боевых) задач и т. д.

При систематизации содержания материалов, описывающих передовой опыт, следует сосредоточиться на выявлении наиболее типичных и интересных фактов, отражающих порядок и последовательность действий отдельных военнослужащих или воинских коллективов, а также на определении детерминации рассматриваемых событий и их итогов.

На III этапе проводится вторичный (более глубокий) анализ опыта для определения основной идеи (замысла) и технологии его воплощения.

В ходе IV этапа предполагается осуществить следующие действия: выявить и систематизировать условия, определившие успешность выполнения боевых (учебно-боевых) задач; определить закономерности, описывающие связи между положениями (содержанием) внедряемого опыта и достигнутыми результатами; формирование научных основ опыта; квалификацию и оценивание результатов; определение факторного пространства, в пределах которого применим распространяемый опыт; выработку рекомендаций по внедрению опыта в практику деятельности войск (сил).

Детализируем несколько подробнее содержание последних двух этапов работы с опытом, реализация которых может вызвать наибольшие затруднения.

В ходе вторичного анализа осуществляются выделение и последующее детальное изучение отдельных составляющих опыта и выявление их взаимной зависимости (влияния). В ходе такого анализа интересующий нас эпизод действий воинского коллектива надлежит рассматривать по следующим характеристикам: цели действий; перечню и последовательности решения частных (типовых) задач, составляющих содержание данного эпизода; структуре и содержанию процедур управления и взаимодействия; перечню и объему затраченных ресурсов (включая время) и т. п.

Также в ходе анализа выявляются противоречия, несоответствия и проблемы в массовой практике, обуславливающие потребность формирования и внедрения рассматриваемого опыта. Например, вследствие появления разведывательно-ударных (разведывательно-огневых) комплексов, способных очень оперативно и очень точно вскрывать и поражать групповые и одиночные цели на большой дальности, возникло явное противоречие между стремлением командиров (командующих, начальников) при создании должного боевого потенциала сосредоточить основную часть войск (сил) на ограниченном пространстве и как

можно ближе к линии боевого соприкосновения и реальной необходимостью их развертывания в рассредоточенных боевых порядках и на значительном удалении от переднего края в целях повышения их защищенности от ударов и огня противника.

Далее выясняется реальная «жизненная проблема» и вытекающие из нее задачи. В нашем примере – это проблема сохранения живучести войск (сил) в новых условиях боевых действий и совокупность задач, реализация которых способствует ее разрешению, а именно: осуществление способов действий воинских формирований в составе небольших по численности подразделений при сохранении их структурной целостности и боевых возможностей (потенциалов); повышение маневренности войск (сил) и скрытности их действий; выполнение организационных и технических мероприятий по увеличению индивидуальной и коллективной защищенности военнослужащих, образцов ВВСТ, наиболее важных элементов боевого порядка (оперативного построения).

Еще раз обратим внимание на то, что, помимо формулирования перечня и сущности задач по разрешению проблем в массовой практике действий войск (сил), очень важно, чтобы усилия творцов передового опыта были сосредоточены на поиске (определении) эффективных способов (порядка, приемов, алгоритмов) их выполнения. Имея в виду, что опыт, характеризующийся оригинальностью замыслов (идей) его реализации, является особенно ценным, следует помнить, что идеи творцов передового опыта не всегда могут быть оригинальны. Иногда важна не сама оригинальность, а своевременность задействования даже ранее используемых алгоритмов, которые в создавшихся условиях (здесь и сейчас) обеспечат успех боя (операции). Необходимо понимать, что грамотное использование (чередование) способов действий, которые ранее применялись, также может привести к намеченному результату. Главное, чтобы это чередование было неожиданным для противника.

Значимость этапа вторичного анализа обусловлена тем, что только хорошо изученный опыт может быть обобщен с требуемой степенью глубины. В рамках этого обобщения устанавливаются зависимости между способами, используемыми войсками (силами) при решении боевых (учебно-боевых) задач, и достигнутыми результатами. Интересующие нас способы квалифицируются следующими обязательными признаками: порядком и последовательностью действий войск (сил); перечнем задействованных сил и средств и их распределением по направлениям и этапам выполнения задач; боевым порядком (оперативным построением); используемыми схемами управления и взаимодействия; подходами при решении вопросов по видам обеспечения и т. д. При возможности корреляция между способами действий и получаемыми результатами описывается с использованием методов формализации.

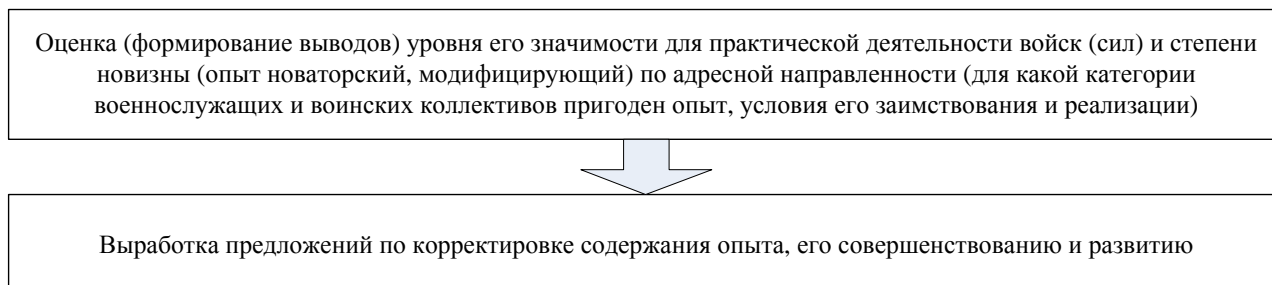
*Обобщение опыта* может осуществляться по двум вариантам (последовательностям). При первом варианте первоначально формируется перечень ситуаций (боевых эпизодов), в факторном поле которых реализация рассматриваемого опыта обусловила положительные результаты. Затем определяются способы (по признакам, перечисленным в предыдущем абзаце), благодаря которым они были достигнуты. При втором варианте сначала описываются способы действий войск (сил), а затем определяются условия среды (обстановки), для которых реализуемый опыт квалифицируется как передовой. При обоих вариантах обобщения проводится научное объяснение закономерных связей между приемами выполнения задач войсками (силами) и получаемыми при этом результатами в конкретных условиях обстановки.

Источниками обобщаемого опыта могут быть лично наблюдаемые исследователем (аналитиком) примеры действий военнослужащих (воинских коллективов), содержание отчетных документов и публикации в соответствующих изданиях, собственный анализ (научные поиск и осмысление) и т. д.

Вместе с тем непосредственно в ходе обобщения опыта должны быть выявлены его научные основы, включающие соответствующие закономерности, подходы, принципы, осознанное или неосознанное использование которых привело к успеху. Значимость и результативность процедуры обобщения будут более весомыми, если удастся определить и подчеркнуть роль личностных качеств военнослужащих, являющихся носителями и реализаторами опыта,

их увлеченности, преданности делу, работоспособности, изобретательности, особо выделить то оригинальное, самобытное, что присуще именно этим исполнителям и творимому при их непосредственном участии опыту.

Итоги, на достижение которых нацелено обобщение передового опыта, представлены на рис. 6.



*Рис. 6. Цели обобщения передового опыта*

*Распространение опыта* осуществляется ответственными должностными лицами путем организации вербального или письменного доведения соответствующей информации до личного состава ОТС ВН; наглядного показа основных элементов, отражающих суть и содержание передового опыта; изучения военнослужащими необходимых знаний и освоения навыков (умений) в ходе мероприятий оперативной (боевой) подготовки. Формами, используемыми для распространения теоретической базы внедряемого опыта, могут быть инструкторско-методические занятия, сборы, методические совещания (советы), научно-практические конференции (круглые столы, чтения), самостоятельное изучение отчетной документации и чтение профильных научных изданий. При распространении опыта, предусматривающего практическое освоение навыков (умений), военнослужащими (воинскими коллективами) отрабатываются необходимые приемы действий при реализации таких форм, как групповые упражнения, тактические (тактико-строевые и тактико-специальные) занятия, тактические (тактико-специальные) учения, индивидуальные и групповые тренировки (тренажи) и т. д.

Продвижение передового опыта в практику – активный, целенаправленный процесс, нацеленный на достижение следующих результатов:

- создание информационно-поисковой системы, вызывающей «живой» интерес у потребителей и использование которой позволит должностным лицам осуществлять оперативное и результативное ознакомление с различными сторонами интересующего их опыта;

- формирование у личного состава чувства осознанной необходимости в инициативном порядке использовать передовой опыт. При решении данного чувства следует доводить до военнослужащих, что эта инициатива «нога в ногу» сопровождается правилом, согласно которому каждый из них волен сам, исходя из собственной потребности и подготовленности, выбирать содержание и конкретные источники передового опыта;

- преодоление трудностей, обусловленных стремлением командиров (командующих, начальников, отдельных военнослужащих) реализовывать исключительно те способы (приемы) действий, которые ими прочно освоены и «удобны» ввиду выработавшейся привычки. Должностных лиц следует убедить, что порядок и последовательность выполнения боевой (учебно-боевой) задачи определяется прежде всего складывающейся обстановкой. И если условия (которые необходимо постоянно и всесторонне оценивать) потребуют – надлежит смело и решительно корректировать или даже радикально менять устоявшиеся подходы по действиям войск (сил) для достижения цели боевых (учебно-боевых) действий. И в основе осуществляемых корректировок и изменений должен лежать передовой опыт, реализованный другими военнослужащими (воинскими коллективами) в схожих условиях обстановки.

*Внедрение (освоение) передового опыта* предполагает его использование как сформировавшейся идеи (замысла, общего подхода) действий, на основе которой должностными лицами, осваивающими или применяющими этот опыт, создаются (вырабатываются) свои варианты (способы) выполнения боевых (учебно-боевых) задач, аналогичные исходной концепции, но скорректированные (адаптированные) в соответствии со складывающимися условиями обстановки.

Освоение опыта не должно сводиться к его копированию. Практика неоднократно подтверждает, что слепое подражание чужим мыслям и алгоритмам действий не всегда обеспечивает достижение нужных результатов. Это неудивительно, ведь просто копируемый опыт вырабатывался в других условиях, другими людьми, реализовывался другими коллективами в несколько другой обстановке. Чужой опыт-образец надлежит рассматривать как лекало, по которому изготавливаются изделия, но уже из несколько другого (собственного) материала или в своей «цветовой гамме». Это исходный образец, мотивирующий творческую личность выработать свой (собственный) порядок (вариант) действий, который может для конкретных условий квалифицироваться как передовой опыт.

Освоение опыта целесообразно осуществлять последовательно, в рамках трех этапов (рис. 7) [3].

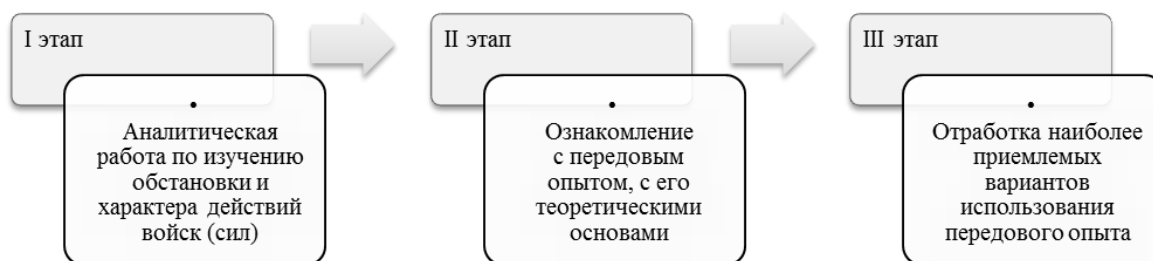


Рис. 7. Предлагаемые этапы последовательного освоения опыта

На I этапе выполняются следующие функции: анализируются условия обстановки, порядок и последовательность действий ОТС ВН; оцениваются (определяются) боевые возможности всех элементов боевого порядка (оперативного построения), участвующих в боевых (учебно-боевых) действиях (эпизодах). Целями проводимой аналитической работы являются выявление наличия объективной необходимости в корректировке или усовершенствовании содержания и алгоритмов осуществления уже освоенных процедур выполнения поставленных задач; выяснение, какие составляющие в системе действий обеспечивают прирост (дают эффект), какие – дают недостаточную результативность, какие – отрицательно сказываются на действиях войск (сил). Итоги проведенного анализа формируют основу нацеленного поиска передового опыта.

На II этапе инициатор освоения (внедрения) опыта организует доведение информации о нем до должностных лиц и воинских коллективов. Такая информация включает данные о знаниях (теоретических основах), навыках и умениях (практическая составляющая), которые составляют целостное понимание о сущности и содержании передового опыта. В ходе такого доведения следует решить две задачи: выяснить «близость» идей и способов, заложенных в опыте, целевому предназначению воинского коллектива (отдельных должностных лиц), их соответствие имеющимся боевым возможностям (тактико-техническим характеристикам образцов вооружения); наглядно продемонстрировать потенциальным исполнителям порядок и последовательность выполнения наиболее важных операций (функций), составляющих наполнение опыта, и тем самым предоставить им возможность более ясно понять его сущность и содержание.

На III этапе определяются и отрабатываются варианты реализации передового опыта, наиболее приемлемые для большинства военнослужащих (воинских коллективов). Началь-

ная концепция опыта адаптируется к конкретным условиям, интегрируется в уже применяемую систему способов и приемов (алгоритмов, методик и т. д.), в той или иной степени переосмысливая ее, служит источником создания нового опыта. На этом этапе необходимы оценивание, детальное наблюдение за итогами, их анализ и обсуждение, а в случае надобности – корректировка. Получению результатов, обладающих большей определенностью и информативностью, будет способствовать поэтапная оценка – оценка результатов, поучаемых в определенные периоды. Эти периоды могут характеризовать время выполнения какой-либо значимой (целевой) функции или время, затраченное на важный тактический (оперативный) эпизод. Полученные промежуточные результаты сравниваются с соответствующими результатами творцов опыта, и в зависимости от итогов сравнения – анализируются причины успехов или неудач. В последующем делается вывод о необходимости расширения (или, напротив, свертывания) процесса внедрения опыта, формируются предложения по его дальнейшему освоению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье методические основы обеспечивают гармоничное вхождение процедур изучения и внедрения передового опыта в процесс военно-научного исследования. Их применение позволяет:

*во-первых*, на основе анализа передового опыта выявлять актуальные противоречия, свойственные практике, а значит, адекватно формулировать перечень проблем и определять направления развития вопросов, связанных с подготовкой и выполнением задач ОТС ВН;

*во-вторых*, применять передовой опыт для обеспечения постоянной и действенной связи теории с практикой. В рамках этой связи осуществляется эффективное и быстрое продвижение достижений военной науки в массовую практику функционирования ОТС ВН. Передовой опыт, воплощая перспективные научные идеи, делает их более прикладными, а значит, более понятными по реализации военнослужащими и воинскими коллективами.

*в-третьих*, задействовать совокупность освоенных знаний и практических навыков, составляющих сущность и содержание передового опыта, как эффективные методические инструменты обучения военнослужащих и боевого слаживания воинских коллективов.

Еще раз подчеркнем, что передовой опыт войск (сил) следует рассматривать и как основу для формирования и осуществления прикладных исследовательских проектов в военной науке, а также методов проверки полученных при этом результатов (указаний, предложений и рекомендаций), внедряемых для совершенствования практической работы должностных лиц и воинских коллективов. Положительные результаты внедрения передового опыта являются мощным побудительным мотивом для командиров (командующих, начальников) осуществлять поиск и последующую реализацию нестандартных решений, развитие и у них творчества и инициативы. Такое последствие внедрения нельзя недооценивать, учитывая реальный консерватизм, силу инерции военного сообщества относительно поиска новаторских форм применения и способов действий войск (сил).

## Список используемых источников

1. Словарь русского языка : в 4 т. / Российская академия наук, Институт лингвистических исследований. – 4-е изд., стер. – М. : Русский язык: Полиграфресурсы, 1999.
2. Мануйлов Ю. С., Новиков Е. А. Методология системных исследований. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2008. – 159 с.
3. Курносоев Ю.В., Конотопов П. Ю. Аналитика: методология, технология и организация информационно-аналитической работы. – М. : РУСАКИ, 2004. – 541 с.

Modeling of joint activities of operators in context-free groups of joint-individual activities based on games on n-cubes and n-simplexes / S. A. Bagretsov, V. M. Kaluga, A. A. Mikhalechikov, O. V. Utochkin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 6–15.

The conditions for achieving states of balance, stability, compatibility and consistency of joint activities of specialists (operators) in context-free groups that implement the principles of joint-individual activity are considered. It is assumed that the basis for the joint activity of specialists in these groups is their local interactions, based on the principles of anticipating the actions of colleagues in conditions of uncertainty and risk and the presence of limited resources, which determines the essence of conflict situations that arise between them. To determine the area of coordination of preference relations between specialists of such groups, a game-theoretic approach is used, implemented within the framework of the logic of implementing game models on n-cubes and n-simplexes, ensuring the minimization of the game situations under consideration. To construct a mathematical model of the game, formal techniques of the apparatus of the theory of mathematical experiment are used. This made it possible to take into account changes in indicators caused by the processes of fatigue, self-learning, etc. and the use of scientifically based methods for statistical analysis of the adequacy of models.

*Key words:* Joint activity, anticipation, coordination, stability, equilibrium, Pareto principle, planned experiment, game theory.

Barinova N. A., Dulishkin R. M., Kasavsev M. Y. Learner model and assessment algorithm his professional and personal qualities in the special software «Education-MO» // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 16–23.

The article considers a student's model and an algorithm for evaluating his professional and personal qualities, which can be implemented in the electronic information and educational environment of a military university. The practice of using special software "Education-MO" revealed the need to create a module for assessing the professional and personal qualities of a student, and an analysis of the existing research results showed the absence of such a model and algorithm for its implementation. This work is devoted to the search for ways to resolve this contradiction.

*Key words:* student's model, algorithm for assessing professional and personal qualities, electronic information and educational environment, special software.

Basyrov A. G., Fakhro F. A model of distributed resource-saving information exchange under conditions of a priori uncertainty of information quality // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 24–32.

The article describes a model of information exchange that takes into account the time and energy costs of implementing information processes of data analysis and transmission in distributed information systems.

The problem statement is formulated and the quality indicators of resource-saving information exchange are introduced. Strategies for optimizing information processes of data analysis and transmission are considered, including those based on parallelization of these processes. The model and problem statement of resource-saving information exchange are illustrated with examples.

*Key words:* distributed information processing, uncertainty, resource-saving exchange, data analysis and transmission strategies.

Kazmin D. Y., Pilkievich S. V. Predictive model of negative impacts in the context of information protection measures // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 33–47.

The construction of a predictive model for the process of conducting negative (destructive) impacts in the context of conflicting interacting information systems is considered. The subject-object approach is used as the basis for prediction, allowing for estimates of the duration of negative impacts to be obtained through the application of a general mathematical apparatus of Markov random processes.

*Key words: prediction, negative (destructive) impact, objects of information infrastructure.*

Model of the process of direction finding of active jammers with super-resolution in multi-function radar stations with a phased array antenna of the transmission type / E. A. Babushkin, R. S. Volodin, R. V. Kalashnikov, A. M. Lavrentiev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 48–57.

The article presents a model of the process of direction finding of active jammers operating from close angular directions in multifunctional radar stations with a pass-through phased array antenna and additional feeds with a digital output when performing algorithms for spectral estimation of angular coordinates.

*Key words: pass-through phased array antenna, direction finding of active jammers, angular super resolution, spatial spectrum.*

Valishin M. S., Novikov E. A., Rakhimov R. R. A methodological approach to the problem of allocating the resource of a communication network and data transmission in the interests of spacecraft control based on the system of Kolmogorov-Chapman equations in differential form // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 58–65.

The article considers an original approach to solving the problem of controlling the data transmission rate in the communication network and data transmission (SSPD) of a ground-based automated spacecraft control complex in the form of feedback based on the use of a system of Kolmogorov – Chapman differential equations with nonstationary parameters. Based on the developed model of the SSPD management process, the task of optimal management is formulated according to the criterion of maximum efficiency of bandwidth use with restrictions on the quality of service of multiservice traffic.

*Key words: non-stationary queuing system, Kolmogorov-Chapman equation, ground control system, spacecraft.*

Garagulya A. S., Kulikov V. S., Maltsev G. N. Investigation of the noise immunity of the radio-electronic system for group control of spacecraft in conditions of intra-system interference // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 66–74.

The influence of intra-system interference caused by the mutual influence of simultaneously operating control channels with code separation on the noise immunity of radio-electronic systems of group control of spacecraft of multi-satellite space systems is considered. A formalized description of in-system interference in a radio-electronic system for group control of spacecraft with code channel separation using phase-manipulated signals with spectrum expansion based on pseudorandom sequences is proposed. The study of the noise immunity of the radio-electronic system for group control of spacecraft in conditions of intra-system interference with code channel separation has been carried out and the limitations associated with the influence of intra-system interference on increasing the number of control channels for spacecraft in one radio-electronic system have been analyzed.

*Key words: radio-electronic systems for group control of spacecraft, code channel separation, noise immunity, pseudorandom sequences, in-system interference.*

*Alekhin S. G., Ivanov R. D.* Qualitative indicators of natural climatic seasons of the year and their assessments under the influence of astronomical factors // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 75–87.

An approach to assessing the qualitative indicators of the natural climatic seasons (NCS) of the year is outlined, taking into account the influence of astronomical factors of the Earth-Moon-Sun system. The mechanism of formation of the EKS and their classification is considered. Estimates of the quality indicators of the CEN were obtained.

*Key words:* natural climatic seasons, lunisolar tides, quantitative and qualitative indicators, impact assessments.

*Andrievskaya V. Y., Astapovich A. V., Medyannikov D. O.* Algorithm for joint processing of satellite and ground geodetic information in a spatial coordinate system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 88–95.

The article discusses an algorithm for joint processing of heterogeneous measurement geodetic information in a local area using the least squares method.

*Key words:* joint processing, satellite geodetic measurements, navigation equipment, electronic tachometers.

Research of anomalies in the total ozone content in the Arctic region according to data for april 2024 / *D. M. Biryukov, A. P. Bondarenko, A. V. Novikov, A. S. Timoshchuk, M. V. Shirobokov* // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 96–103.

The article presents the results of research of anomalies in the total ozone content and associated synoptic processes in the Arctic region in April 2024. The authors propose the use of space-based satellite means of remote sensing of the Earth and an archive of combined kinematic maps of baric topography to study synoptic processes observed in conjunction with anomalies of the total ozone content. Conclusions are drawn about the relationship of abnormal levels of total ozone in the Arctic region with the observed synoptic processes.

*Key words:* total ozone content, meteorological satellites, synoptic processes, remote sensing, Arctic region.

*Gotyur I. A., Ovchinnikov Y. D.* Assessment of the informativeness of predictors for forecasting dangerous meteorological phenomena using a deep machine learning model // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 104–111.

The paper considers the issue of the informativeness of predictors for estimating the predicted parameter in the context of a generalized model. A method for estimating the Fisher information matrix using the normalizing flows method for approximating the empirical logarithmic likelihood function with a differentiable model distribution is proposed. The proposed method allows for a higher and more reliable estimate of the lower limit of the informativeness of predictors in comparison with known empirical methods due to the use of a model that takes into account complex non-linear dependencies in the data.

*Key words:* informativeness, Fisher information matrix, normalizing flows.

*Avsyukevich D. A., Egorichev M. V.* The concept of building an intelligent adaptive ventilation and air conditioning system for special buildings // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 112–119.

The issue of using intelligent methods for controlling the ventilation and air conditioning system in special buildings to increase their energy efficiency is considered. To achieve this goal, an intel-



ligent controller is proposed. The implementation of the proposed concept for constructing an intelligent adaptive ventilation and air conditioning system allows for the development of control algorithms that will ensure automatic adaptation of the operating parameters of the ventilation and air conditioning system under conditions of changing external and internal factors that affect the functioning of the system, while maintaining optimal conditions in the structure for temperature, humidity and air purity depending on the actual load.

*Key words: automatic remote control system, intelligent control methods, energy efficiency, adaptive ventilation and air conditioning system, ventilation and air conditioning system according to actual needs.*

*Antropova A. V., Kozlov V. V., Stelmakh S. F.* Mathematical modeling of the functioning of electromechanical drives providing systems of small spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 120–130.

The main provisions of a mathematical discrete model of mechanical elements of electromechanical drives providing systems for small spacecraft, which allows us to consider and describe in detail the conditions under which an unplanned transition to a state other than the working one is possible. Based on this detailed description, it is possible to make the decision necessary for management electromechanical drives of the supporting systems of small spacecraft in abnormal states

*Key words: electromechanical drive, small spacecraft, modeling, mechanism.*

Method for measuring the thrust force of an electric jet engine during ground experimental testing / I. V. Apevalov, P. S. Goncharov, L. P. Zozulya, A. L. Kopeyka // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 131–138.

A method is presented that allows one to measure the thrust force of an electric rocket engine (ERE). The method is based on taking measurements using a suspended pendulum design, which includes a vacuum chamber with an instrument compartment. The tests take place under conditions close to the actual operating conditions of the electric propulsion engine. The method consists in determining the traction force of the electric propulsion engine by measuring in the pressure chamber the displacement to the state of equilibrium of the center of mass of the electric propulsion engine under the influence of forces. Data processing to determine the traction force in steady state was carried out taking into account the identified errors.

*Key words: electric rocket engine, traction force, pendulum measuring stand, vacuum chamber.*

*Basotin E. V., Vivchar R. M., Ptushkin A. I.* The concept of proactive management of the operation of ground-based space infrastructure // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 139–152.

This article proposes a new concept for managing the operation of ground-based space infrastructure, based on the use of both traditional methods of proactive management (preventive and predictive) as well as proactive management of a new generation, which not only anticipates the onset of negative events, but also ensures a decrease in the frequency of occurrence of similar events in the future. At the same time, the concept provides for the achievement of the desired future as the goal of management, and not the traditional object – the operation process – as the object of management, but a dynamic system of circumstances characterizing the operational situation in which this process is one of the circumstances. The necessary conceptual framework, a system of principles for building the proposed proactive operation management system, a methodology for scientific analysis of the operational situation and management decision-making have been developed. The proposed concept will ensure a higher efficiency of the use of domestic ground-based space infrastructure facilities compared with foreign analogues, in particular, to increase the service

life, safety and environmental friendliness of its operation, reduce the total duration of equipment downtime, as well as operating costs.

*Key words: ground-based space infrastructure, operation, concept, proactivity, strategies, proactive management, preventive management, predictive management, superactive management.*

Voronin A. E., Peshehonov N. E., Rybakov V. V. Determination of the installation locations of backup power sources. // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 153–157.

The provision of consumers of the first category in terms of reliability of power supply using backup power sources, taking into account the economic indicators of all elements of the power supply system, is considered. The procedure for constructing a diagram to determine the critical length of an electric transmission line is defined, in which the economic indicators of centralized and decentralized components of building a backup power supply system are equal.

*Key words: sources of backup power supply, annual reduced costs, optimization task, structure of the backup power supply system.*

Methodology for Assessing the Condition of the Launcher Gas Duct / I. A. Efremkov, V. V. Kozlov, A. V. Lagun, A. D. Syrov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 158–165.

The article presents approaches to solving the problem of determining the causes of low durability of the steel lining of the gas duct of launchers of rocket and space complexes and provides proposals for possible options for restoring the working condition of the gas duct of launchers.

New analytical relationships are obtained for the evaluation engineering calculation of the loading processes of the structures of launch equipment, typical for the conditions of launching space rockets.

*Key words: launch equipment, combustion product stream, gas-dynamic loads, thermal loads, strength, durability.*

Kamchalov S.S., Karagodin V.V., Polyanskiy K.A. The methodology of structural and parametric optimization of the uninterruptible power supply system for ground-based space infrastructure facilities using clustering algorithms // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 166–179.

This article substantiates the need to optimize the structure and parameters of power supply systems for ground-based space infrastructure, examines existing approaches to solving the problem of optimizing uninterruptible power supply systems, and also proposes a new approach to determining its configuration using a modified clustering algorithm.

*Key words: ground-based space infrastructure facility, power supply system, uninterrupted power supply system, optimization, configuration, clustering algorithms.*

Manukhov I. G. A methodical approach to the experimental evaluation of the characteristics of complex technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 180–190.

The article considers an approach to assessing the quality of testing complex technical systems. The reliability of the test results is considered as a characteristic of the quality of testing. This characteristic is introduced in order to determine the degree of compliance of the measured (analytically calculated) indicators with the true characteristics of the prototype product. The solution to this problem is to determine the confidence interval of estimates of the measured parameters. This approach makes it possible to increase the accuracy of evaluating the technical characteristics of the tested sample of weapons and military equipment for their subsequent comparison with those specified in the tactical and technical task for development work.

*Key words: testing of complex technical systems, reliability of testing, standard error, confidence interval, processing of a limited number of experiments.*

Method of estimation of the margin of longitudinal dynamic stability of a liquid-propellant rocket with a serial connection of stages using a narrow-band filter / A. N. Mironov, A. I. Petukhov, P. A. Stepanov, A. E. Sultanov // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release. – P. 191–198.

The possibility of using a narrow-band filter (NBF) to estimate the longitudinal dynamic stability margin of launch vehicles (LV) with a series connection of stages (SCS) was studied by segregating a polyharmonic signal to detect frequencies and shapes of longitudinal oscillations of the LV body. A program for calculating longitudinal self-oscillations in the Simulink software environment was developed, which allows increasing the accuracy of calculating longitudinal self-oscillations of the LV body. A technique for analyzing the stability of a multi-loop dynamic system "liquid rocket engine (LRE) - launch vehicle (LV) body" by the spectrum of the matrix using a narrow-band filter is presented. The effectiveness of the described technique is demonstrated using the example of analyzing the dynamic impact of the LV and LRE body.

*Key words: narrow-band filter, longitudinal self-oscillations of the launch vehicle body, reliability.*

Mitsuk M. R., Popov N. A. The technique of two-level control of the technical condition and diagnostics of on-board systems of small spacecraft // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 199–212.

To increase the autonomy and life cycle of complex technical systems, a methodology for assessing the technical condition and technical diagnostics of small spacecraft using an intelligent decision support system is proposed. The peculiarity of the technique is the statistical control of the stability of changing values of diagnostic parameters. Verification of the developed methodology was carried out on the basis of simulation data of the operation of the thermal regime system of a small spacecraft.

*Key words: small spacecraft, technical diagnostics, intelligent system, neural network, multi-layer perceptron, multiclass classification, statistical control.*

Simulation of working processes in the stages of a reciprocating compressor with additional heat exchangers built into the discharge cavity / Y. I. Molodova, I. V. Naumchik, M. V. Pomoshnik, I. K. Prilutsky // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 213–219.

The results of a study of working processes that take into account non-stationary heat transfer in the discharge cavity of a piston compressor stage are presented. The computational and theoretical analysis of the operation of the piston compressor stage was carried out using the ANSYS program. The main attention is paid to the analysis of technical and economic indicators of existing multi-stage compressors with additional heat exchangers built into the discharge cavity of the piston compressor stage. The scientific solution of the problem is based on the application of the author's program "KOMDET-VKA", which is based on a mathematical description of the properties of real gases and ongoing physical processes based on the fundamental equations of thermodynamics of a body of variable mass, heat transfer and mass transfer, mechanics and gas dynamics in combination with a set of empirical coefficients and dependencies, structurally diverse simulation devices, laboratory and full-scale samples of piston machines obtained during testing.

*Key words: reciprocating compressor, gas supply system, current operating processes, integrated parameters, convective heat transfer, standard injection point, additional heat exchanger.*

Popov A. M., Tkachenko V. V., Shmelev V. V. Methodology of automated verification and debugging of the structural and functional model of the telemetry information processing process // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 220–230.

The article presents the results of the analysis of the operation of complexes for processing measuring information of launch vehicles during tests and launches. Examples of errors affecting the presentation of measurement information on the technical condition of on-board launch vehicle systems are given, which does not allow an adequate assessment of the regular functioning of products, both during testing and during regular operation of products.

The necessity of developing a methodology that provides an increase in the degree of confidence in the functioning of processing algorithms through the introduction of verification of source data into the structure of the processing process and the logic of building special software and mathematical support (SPMO) is substantiated.

An example of the implementation of the technique in the conditions of abnormal behavior of the telemetry parameters (TMP) in the event of various kinds of errors in the algorithms for processing telemetric information (TMI) is given. It is shown how errors in the behavior of Petri net properties are interpreted. An example of finding and correcting errors using formal mathematical tools of Petri nets is described.

*Key words: algorithms for processing telemetric information, errors in processing algorithms, Petri nets, analysis of Petri nets properties, model verification, model debugging, correction, simulation of calculated processes.*

*Golubev M. A., Rozanova L. V.* A model of the internal educational quality assessment system of a military educational institution // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 231–240.

The publication discusses a possible approach to the formation of an internal system for assessing the quality of education. Its model was developed and tested at the Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky.

*Key words: military educational institution, internal educational quality assessment system, educational activity, educational process.*

*Kuzhikin N. S., Myshko V. V., Chikurov V. A.* About the training of military specialists in the field of information technology, taking into account the variability of requirements for professional competencies // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 241–252.

It is seemed a conceptual approach to the forming of military specialists training in the field of modern information technologies taking into account variability of requirements to competencies of graduate officers. The approach is based on experience of problematic issues solving that arose in stage of basic professional educational programs and academic plans development in modern conditions.

*Key words: basic professional educational program, academic plan, model of specialist training, information technologies.*

*Soloviev D. A.* System for training executives in the field of pedagogy at a higher military school // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 253–258.

The article discusses problematic issues of creating and improving the training system for heads of pedagogical and scientific departments at the academy.

*Key words: specialist training system, retraining and advanced training of management personnel.*

*Ogorodnikov V. P.* Actual problems of the philosophical and methodological foundations of quantum mechanics // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 259–266.

The article reveals the philosophical and methodological foundations of the crisis of physics in the late 19th – mid-20th centuries and today's problems of interpreting the facts of quantum me-

chanics. The greatest attention is paid to the analysis of the works of the founder of quantum mechanics W. Heisenberg.

It is proved that all difficulties in the development of quantum theory are based on metaphysical (anti-dialectical) and idealist philosophical methodology. In particular, the negative role of Laplace's determinism and indeterminism, the identification of conceptual schemes with objective reality, and the use of the logic of the construction of a theory as a criterion of its truth are shown. Revealing the methodological errors of specialists in the field of quantum mechanics, the author, on the basis of dialectical-materialist methodology, offers solutions to the paradoxes of this promising field of scientific knowledge.

*Key words: quantum theory, methodology, Copenhagen concept, wave function, uncertainty principle, consistency and truth.*

*Chernyaev E. V.* On the issue of the state and trends in the development of rocket and space activities in the Russian Federation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 267–281.

In modern geopolitical conditions, rocket and space activities are relevant in all spheres of existence. At the same time, global trends in its development create, on the one hand, preferences for the promotion of Russian products to the world market, on the other hand, limit its development in conditions of sanctions restrictions. This requires an adequate response from the rocket and space industry, both economically and technologically. In conclusion, the author highlights the forecast trends for the further development of rocket and space activities in Russia.

*Key words: rocket and space activities, launch vehicles, SWOT analysis, development trends, spaceports.*

Mathematical processing of experimental data on the selection of the composition of heat-resistant foam concrete for use in the gas duct of the Angara universal launch complex / S. E. Aleshichev, V. V. Duga, S. S. Ryabova, A. M. Sycheva // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 282–289.

The method of processing experimental data obtained during the study of the physical and mechanical properties of heat-resistant foam concrete is considered in order to form mathematical models that allow predicting the properties of the developed compositions of heat-resistant foam concrete, as well as assessing the degree of influence of significant factors in the technological process of foam concrete for the formation of its properties.

*Key words: mathematical processing, experimental data, formation of physical and mechanical properties, heat-resistant foam concrete, frost resistance.*

*Goncharov O. V., Kazakhov B. D., Saltykov K. B.* Methodical approaches to the study and implementation of best practices in the practice of military organizational and technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 692. – P. 290–301.

Methodical approaches to the implementation of procedures for studying and introducing the experience of military organizational-technical systems in performing their intended tasks are presented. The features on the basis of which the best practices are singled out are formed. The sequence (procedure) of work on the study of experience and recommendations on its introduction (mastering) into the practice of military organizational and technical systems is proposed.

*Key words: experience of task performance, attributes of best practices, procedures for studying and implementing best practices.*

**Авсюкевич Дмитрий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Алёхин Сергей Григорьевич**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-56, e-mail: vka@mil.ru

**Алешичев Сергей Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Андриевская Виктория Юрьевна**, кандидат физико-математических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Антропова Александра Владимировна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

**Апевалов Игорь Владимирович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Астапович Анатолий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Бабушкин Евгений Александрович**, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны (Россия, 150001, Ярославль, Московский пр., 28); тел.: 8 (905) 630-65-56, e-mail: bebs37@mail.ru

**Багрецов Сергей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

**Барина Нина Анатольевна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-29, e-mail: vka@mil.ru

**Басотин Евгений Викторович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 273-47-82, e-mail: vka@mil.ru

**Басыров Александр Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: Vka\_24kaf@mil.ru

**Бирюков Даниил Михайлович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (812) 347-95-52.

**Бондаренко Александр Петрович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (812) 347-95-52.

**Валишин Марсель Шамилевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Вивчарь Роман Михайлович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 686-99-46, e-mail: vka@mil.ru

**Володин Роман Сергеевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (901) 272-22-85, e-mail: vka@mil.ru

**Воронин Алексей Евгеньевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Гарагуля Александр Степанович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-75, e-mail: vka@mil.ru

**Голубев Михаил Александрович**, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-31, e-mail: vka@mil.ru

**Гончаров Олег Викторович**, Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации (119571, Россия, Москва, пр. Вернадского, 100); тел.: 8 (977) 603-15-99.

**Гончаров Павел Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

**Готюр Иван Алексеевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Дуга Вадим Вадимович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Дулишкин Руслан Михайлович**, Управление учета военнослужащих ГУК МО РФ (119160, г. Москва, 1-й Хорошевский проезд, 3); e-mail: dulishkin.ruslan@mail.ru

**Егоричев Максим Вячеславович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-43, e-mail: vka@mil.ru

**Ефременков Илья Александрович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

**Зозуля Людмила Петровна**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 780-20-16, e-mail: vka@mil.ru

**Иванов Роман Дмитриевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-91, e-mail: vka@mil.ru

**Казахов Батраз Джумаевич**, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Казьмин Денис Юрьевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская 13); тел. 8(812) 237-96-54, e-mail: vka@mil.ru

**Калашников Роман Васильевич**, кандидат технических наук; Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны (Россия, 150001, Ярославль, Московский пр., 28); тел.: 8 (920) 102-35-88, e-mail: karomm12@mail.ru

**Калуга Виктор Михайлович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

**Камчалов Сергей Сергеевич**, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Карагодин Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Касавцев Михаил Юрьевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-25, e-mail: vka@mil.ru

**Козлов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

**Копейка Александр Леонидович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

**Кужекин Николай Сергеевич**, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-96, e-mail: vka@mil.ru

**Куликов Виталий Сергеевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-75, e-mail: vka@mil.ru

**Лаврентьев Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор; Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны (Россия, 150001, Ярославль, Московский пр., 28); тел.: 8 (910) 829-35-21, e-mail: alexalawrentew24@icloud.com



**Лагун Андрей Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

**Мальцев Георгий Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-75, e-mail: vka@mil.ru

**Манухов Игорь Геннадьевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8(812)347-95-33, e-mail: vka@mil.ru

**Медяников Даниил Олегович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Миронов Андрей Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Михалченков Алексей Александрович**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

**Мицук Максим Романович**, Военный инновационный технополис «ЭРА» (353456, Россия, Краснодарский край, Анапа, Пионерский пр., 41); e-mail: maxim.mitsuk@yandex.ru

**Молодова Юлия Игоревна**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Мышко Василий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

**Наумчик Игорь Васильевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Новиков Александр Валерьевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-52.

**Новиков Евгений Александрович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Овчинников Юрий Дмитриевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Огородников Владимир Петрович**, доктор философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Петухов Антон Иванович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Пешехонов Николай Егорович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Пилькевич Сергей Владимирович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская 13); тел. 8 (812) 237-96-54, e-mail: vka@mil.ru

**Полянский Константин Аркадьевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Помошник Максим Викторович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Попов Антон Михайлович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-65, e-mail: vka@mil.ru

**Попов Никита Александрович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

**Прилуцкий Игорь Кирович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Птушкин Анатолий Иванович**, кандидат технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 273-47-82, e-mail: vka@mil.ru

**Рахимов Руслан Рахмоналиевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Розанова Людмила Владимировна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-31, e-mail: vka@mil.ru

**Рыбаков Вячеслав Вячеславович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Рябова Светлана Сергеевна**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Салтыков Константин Борисович**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-94-31.

**Соловьев Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Стельмах Станислав Феликсович**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

**Степанов Павел Алексеевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Султанов Алексей Эдыгарович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Сыров Артем Дмитриевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

**Сычева Анастасия Максимовна**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Тимошук Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Ткаченко Владимир Викторович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-65, e-mail: vka@mil.ru

**Уточкин Олег Владиславович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-81, e-mail: vka@mil.ru

**Факхро Файруз**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), e-mail: vka@mil.ru

**Черняев Евгений Васильевич**, кандидат экономических наук; Вольский военный институт материального обеспечения (412903, Россия, Саратовская область, Вольск, ул. М. Горького, 3); тел.: 8 (929)705 90 63, e-mail: ki-la@mail.ru

**Чикуров Виталий Александрович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-65, e-mail: vka@mil.ru

**Широбоков Максим Вячеславович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел. 8 (812) 347-95-52.

**Шмелев Валентин Валерьевич**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-65, e-mail: vka@mil.ru

**Абдурахимов Алексей Александрович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mil.ru

**Алексеев Виктор Фёдорович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Басотин Евгений Викторович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Басыров Александр Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-31.

**Девяткин Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-60.

**Еремеев Игорь Юрьевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Каргу Дмитрий Леонидович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

**Косырев Сергей Викторович**, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-93.

**Кужекин Николай Сергеевич**, кандидат философских наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Лебедев Евгений Леонидович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), тел.: 8 (812) 347-95-11, e-mail: vka@mil.ru

**Ломако Александр Григорьевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Лоскутов Андрей Иванович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Лохвицкий Владимир Александрович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Маков Александр Борисович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Мальцев Георгий Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Минаков Евгений Петрович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Миронов Андрей Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-74.

**Павлов Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-62.

**Паршуткин Андрей Викторович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Пирогов Сергей Юрьевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Попов Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Радионов Николай Васильевич**, доктор экономических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Репях Николай Андреевич**, кандидат философских наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Садин Дмитрий Викторович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Чарушников Александр Валерьевич**, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

**Якимов Виктор Леонидович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru