

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

**Выпуск 681**

Проблемы обеспечения  
функционирования  
и развития наземной  
инфраструктуры  
комплексов систем  
вооружения

2022 г.

Издатель:

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

Редакционный совет

Председатель:

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

Члены редакционного совета:

- С. В. Буг* – 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, доц.;  
*И. А. Готюр*, доктор техн. наук, доц.; *А. П. Доронин*, доктор техн. наук, проф.;  
*И. Ю. Еремеев*, доктор техн. наук, проф.; *В. Н. Калинин*, доктор техн. наук, проф.;  
*Б. Д. Казахов*, доктор воен. наук, проф.; *В. В. Клейменов*, доктор техн. наук, проф.;  
*В. В. Козлов*, доктор техн. наук, проф.; *Н. С. Кужекин*, кандидат филос. наук, проф.;  
*В. Н. Кузьмин*, доктор воен. наук, проф.; *Н. Б. Кунтурова*, доктор пед. наук, доц.;  
*Е. Л. Лебедев*, доктор техн. наук, проф.; *А. Г. Ломако*, доктор техн. наук, проф.;  
*А. И. Лоскутов*, доктор техн. наук, проф.; *Г. Н. Мальцев*, доктор техн. наук, проф.;  
*Т. О. Мысливцев*, доктор техн. наук, доц.; *А. Н. Павлов*, доктор техн. наук, проф.;  
*А. В. Паршуткин*, доктор техн. наук, проф.; *Н. А. Репях*, кандидат филос. наук, доц.;  
*А. М. Сычева*, доктор техн. наук, доц.; *И. В. Фоминов*, доктор техн. наук, доц.;  
*А. В. Харченко*, доктор техн. наук, проф.; *К. Ю. Цветков*, доктор техн. наук, проф.;  
*А. В. Чарушников*, доктор воен. наук, проф.

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

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

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

Подписано к печ. 09.03.2022.  
Формат печатного листа 445×300/4.  
Уч.-печ. л. 55,00. Уч.-изд. л. 27,25  
Тираж 30 экз. Заказ 3951/81.  
Отпечатано в типографии  
Военно-космической академии  
имени А. Ф. Можайского

## СОДЕРЖАНИЕ

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

<i>Абсалямов Д. Р., Сеньченков В. И.</i> Формирование множества контролируемых параметров специальных технических систем на основе теории ортогональных преобразований.....	6
<i>Анисимов Ю. П.</i> Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод.....	20
<i>Вакуненко В. А., Мусатов В. И., Николаев А. В., Саркисов С. В.</i> Оценка работы источников капельного орошения.....	27
<i>Вишняков Е. П., Ильин А. В., Рыбаков В. В.</i> Вопрос повышения эффективности эксплуатации системы электроснабжения объектов военной инфраструктуры.....	32
<i>Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В.</i> Оптимизация режима работы кольцевых распределительных сетей систем электроснабжения по минимуму потерь электрической энергии.....	40
<i>Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В.</i> Оценка эффективности резервирования систем электроснабжения дизельными электростанциями в различных режимах их функционирования.....	46
<i>Горин В. А., Карагодин В. В., Хомич И. В.</i> Построение и расчет математической модели бесщеточного синхронного генератора для исследования режимов в системах автономного электроснабжения.....	54
<i>Горин В. А., Карагодин В. В., Хомич И. В.</i> Расчет оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами одного класса с применением среды MatLab.....	64
<i>Двинин В. А., Кретюк Д. А., Рыбаков Д. В.</i> Стратегия формирования структуры систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры при изменяющихся местах посадки, числе и мощности потребителей.....	71
<i>Зубарев А. В., Прищепина Д. Н.</i> Математическая модель системы непрерывного мониторинга кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена.....	77
<i>Зубарев А. В., Прищепина Д. Н.</i> Механизмы выбора значений параметров технического обслуживания элементов системы электроснабжения объектов военной инфраструктуры.....	84
<i>Карагодин В. В., Ревяков Б. А., Рыбаков Д. В.</i> Исследование аварийных режимов работы систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры с помощью математического пакета MatLab.....	89
<i>Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Смирнов С. В.</i> Оценка влияния потребителей на уровень электромагнитной совместимости в точке подключения к системе электроснабжения специальных комплексов.....	97

*Литвинова Н. Б., Росляков Е. М., Тупицин Ю. Е.* Подготовка эксплуатационного персонала с помощью виртуальных тренажеров специальных технических систем..... 104

*Литвинова Н. Б., Тупицин Ю. Е., Шишкин Е. В.* Методика определения оптимальных периодов проведения технического обслуживания механического оборудования специальных технических систем при использовании гибких стратегий эксплуатации..... 109

*Некрасов И. Н., Пудиков В. В., Шишкин Е. В.* Алгоритм управления системами кондиционирования воздуха специальных объектов на основе энергосбережения..... 115

## ВОЕННО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И КОНСТРУКЦИИ

*Авсюкевич Д. А., Мандрица Д. П.* Разработка модели процесса восстановления специальных сооружений на основе риска возникновения аварийных ситуаций..... 119

*Алешичев С. Е., Старчуков Д. С., Сычева А. М.* Математическая модель расчета прочности бетонного образца в монолитной неорганической обойме..... 125

*Буслов А. А., Гусев Н. Н., Кучеренко А. О.* Метод корректировки амплитудной погрешности струнных преобразователей тензометрических комплектов систем мониторинга технического состояния специальных сооружений..... 129

*Величкин В. З., Городишенина А. Ю., Петроченко М. В., Тюрин Е. А.* Методика точной организации работ при возведении сооружения технологического блока ракетно-космического комплекса..... 135

*Гера В. И., Гула Д. Н., Котович В. Г., Рябова С. С., Сычева А. М.* Технические решения с применением жаростойкого пенобетона для конструкций газохода универсального стартового комплекса космического ракетного комплекса «Ангара»..... 141

*Гинзбург Т. В., Зарин С. В., Щербуль К. С.* Методика контроля технического состояния несущих железобетонных конструкций стартовых сооружений по их частоте собственных колебаний..... 147

*Ерохин О. А., Карасёв С. Ю., Сурин Д. В.* Экспериментальное моделирование рикошета средств поражения проникающего типа от защитной конструкции специальных сооружений..... 156

*Карасёв С. Ю., Мачнев С. А., Тюрин Е. А.* Научно-методические подходы по определению сопротивления теплопередаче арочных обсыпных сооружений специального назначения..... 163

*Ковалев Ф. Е., Мохнаткин А. П.* Методика оценивания допредельных и предельных состояний пролетных железобетонных конструкций стартовых сооружений по параметру высоты сжатой зоны бетона..... 170

*Козлов Н. А., Котович В. Г., Сергеев Д. В.* Геодезический контроль деформаций наземных объектов космической инфраструктуры посредством способа прямой векторной засечки..... 176

*Лебедь Б. П., Толмачёв С. А., Шевчук А. М.* Концепция создания перспективных мобильно-защищенных комплексов систем вооружения..... 180

<i>Лебедь Б. П., Толмачёв С. А., Шевчук А. М.</i> Обоснование требований к маскировке военных объектов с учетом наличия выносных ориентиров прицеливания.....	186
<i>Мионов А. Н., Солдатенко Т. Н.</i> Модель определения значений параметров оптимальной по критерию минимального риска стратегии технической эксплуатации стартового сооружения.....	192
<i>Старчуков Д. С., Сычева А. М.</i> Моделирование процессов формирования качества высокопрочного бетона на основе зольсодержащих растворов.....	197
Рефераты статей .....	205
Сведения об авторах .....	213
Сведения о рецензентах .....	218

Д. Р. Абсалямов,  
*доктор технических наук, доцент;*  
В. И. Сеньченков,  
*доктор технических наук, профессор*

## **ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Представляются методические и математические схемы формирования множества информативных (контролируемых) параметров специальных технических систем ракетно-космических комплексов при интервальном контроле состояния. Содержание схем заключается в обработке траекторий выходных параметров системы с привлечением теории ортогональных преобразований. Обоснован выбор контролируемых параметров как упорядоченного множества коэффициентов разложения траекторий в частичные суммы ряда Фурье на основе ортогональных алгебраических базисов. Предлагается подход к аппроксимации траекторий частичными суммами ряда Фурье с применением ортогонального базиса Лежандра, который подвергнут модификации для использования при любых временных интервалах контроля технического состояния. Разработан усовершенствованный способ определения мощности множества контролируемых параметров. Предъявляется численная процедура поиска значений контролируемых параметров при разложении траекторий, аналитический вид которых неизвестен.

Показаны результаты обработки траектории одной из физических величин, характеризующих функционирование специальных технических систем, и задание на указанной основе множества контролируемых параметров.

Ключевые слова: интервальный контроль технического состояния, частичные суммы ряда Фурье-Лежандра, ортогональный алгебраический базис, среднеквадратичная сходимость.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вывод на новые рубежи процессов эксплуатации ракетно-космических комплексов (РКК) предполагает разработку и внедрение методических подходов и аппаратных средств получения объективных данных о техническом состоянии систем, входящих в указанные комплексы. Так, функционирование специальных технических систем (СТС) характеризуется сложными процессами материального и энергетического обмена между отдельными подсистемами. Во избежание сбоев в данных процессах и отказов оборудования необходим контроль технического состояния не только в отдельные моменты времени (точечный контроль), но и в течение определенных временных интервалов (интервальный контроль).

При интервальном контроле регистрируются траектории физических величин, которые определяют процессы функционирования СТС. Под траекторией  $f$  понимается множество значений какой-либо переменной на временном интервале  $T$ . Изменение технического состояния системы сопровождается изменением траекторий. Пусть каждая траектория представляется в виде упорядоченного набора (или вектора)

$$\mathbf{Y}_{(n)} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \quad (1)$$

числовых характеристик, которые однозначно описывают ее поведение на множестве  $T$ . В этом случае координаты  $y_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  вектора (1) могут выступать в качестве информативных или контролируемых параметров системы.

В настоящее время предлагается обширный научный материал по заданию векторов вида (1).

В исследованиях [1–3] преобразование базируется на теории случайных процессов. Находятся оценки числовых характеристик траекторий как случайных функций – математическое

ожидание, дисперсия, асимметрия, эксцесс, другие начальные или центральные моменты. Из полученных характеристик формируется искомый вектор (1).

В работах [4, 5] предполагается, что траектории удовлетворяют условиям теоремы Липшица [6]. Данные условия сводятся к тому, что траектория должна быть непрерывной и, кроме того, иметь ограниченную скорость изменения на интервале  $T$ . Такой случай характерен для инерционных параметров, например, температуры теплоносителя или подшипников в сопрягающихся узлах изделия, уровня жидкой среды. Выбор по определенным правилам множества дискретных значений траектории позволяет сформировать конечномерный вектор.

Также предлагаются методы на основе аналого-стохастического квантования [7], в результате которого траектория задается в виде цифрового кода. Такой код является основой для получения координат вектора (1).

### ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО БАЗИСА ЛЕЖАНДРА ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ В ЧАСТИЧНЫЕ СУММЫ РЯДА ФУРЬЕ

Отсутствие методологического единства в схемах, которые используются для задания множества контролируемых параметров системы, может сопровождаться трудностями в построении моделей диагностирования и интерпретации результатов исследований. Для преодоления указанных трудностей преобразование различных выходных процессов СТС должно опираться на общую теоретическую базу.

В работах [8, 9] развивается подход, который базируется на разложении траекторий в частичные суммы рядов Фурье по различным ортогональным базисам. Коэффициенты разложения позволяют иметь сведения обо всех особенностях траектории на множестве  $T$ , так как вычисляются однозначно. По этой причине в данных коэффициентах аккумулирована информация о техническом состоянии системы, и они могут применяться в качестве контролируемых параметров.

Пусть  $\{\varphi_k / k = 0, 1, 2, \dots\}$  – произвольный ортогональный базис с областью ортогональности  $T$ . Временной интервал  $T$  в данном случае следует трактовать как подмножество в множестве вещественных чисел  $\mathbf{R}$  ( $T \subset \mathbf{R}$ ). Тогда частичная сумма порядка  $m$  ряда Фурье для траектории  $f$  определяется выражением

$$S^m = \sum_{k=0}^m c_k \varphi_k . \quad (2)$$

Коэффициенты Фурье в частичной сумме (2) находятся как

$$c_k = \frac{1}{\|\varphi_k\|_T^2} \int_T f(t) \varphi_k(t) dt , \quad (3)$$

где  $\|\varphi_k\|$  – норма  $k$ -й базисной функции.

Для дальнейших рассуждений важно заметить, что квадрат нормированного значения базисной функции – это скалярное произведение данной функции на себя [10]:

$$\|\varphi_k\|^2 = (\varphi_k, \varphi_k) = \int_T \varphi_k^2(t) dt . \quad (4)$$

Сходимость ряда Фурье к траектории задается условием

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbf{N} : \left\| f - \sum_{k=0}^m c_k \varphi_k \right\|^2 < \varepsilon , \quad m > N , \quad (5)$$

где  $\mathbf{N}$  – множество натуральных чисел.

Условие (5) определяет среднеквадратичную сходимость, которая предоставляет возможность отслеживать поведение траектории не в фиксированных точках или в рамках локальных отрезков, а на всем интервале времени  $T$ . Указанный факт делает предпочтительным использование такого типа сходимости перед другими – поточечной или равномерной сходимостью.

Возникает вопрос, какой ортогональный базис из перечня общеизвестных тригонометрических и алгебраических базисов наиболее рационально применять при формировании множества контролируемых параметров. Данный вопрос связан с особенностями траектории. Тригонометрические базисы позволяют точно учитывать периодическую составляющую, поэтому они имеют преимущество при обработке траекторий вибрационных или акустических процессов, когда система включает инерционные массы с вращательным и (или) возвратно-поступательным движением. Данный случай рассматривается в работе [9].

При отсутствии или неявной выраженности периодической составляющей необходимо использовать алгебраические базисы, частичные суммы которых обеспечивают более гибкое приближение к траекториям с данной особенностью. К числу алгебраических относится базис Лежандра. Применение указанного базиса для разложения функции в частичные суммы ряда Фурье основывается на предположении, что область ее определения является ограниченным множеством. Очевидно, что временной интервал  $T$  относится именно к таким множествам, поскольку он совпадает с продолжительностью регистрации траектории в контрольной точке системы.

Областью ортогональности классического базиса Лежандра

$$L_k(x), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

является интервал  $[-1; 1]$ . В выражении (6) аргумент  $x$  – некоторая абстрактная переменная, которой не придается какого-либо физического смысла. Для вывода элементов такого базиса (базисных функций) используется формула Родрига [11]:

$$L_k(x) = \frac{1}{k! \cdot 2^k} \frac{d^k}{dx^k} [(x^2 - 1)^k], \quad (7)$$

где  $\frac{d^k}{dx^k}[\cdot]$  – производная  $k$ -го порядка по переменной  $x$ ;

$k!$  – факториал числа  $k$  ( $k! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot k$ ,  $0! = 1$ ).

Например, из соотношения (7) вытекает

$$\begin{aligned} L_3(x) &= \frac{1}{3! \cdot 2^3} \frac{d^3}{dx^3} [(x^2 - 1)^3] = \frac{1}{6 \cdot 8} \frac{d^2}{dx^2} \left[ 3(x^2 - 1)^2 \cdot \frac{d}{dx} (x^2 - 1) \right] = \frac{6}{48} \frac{d^2}{dx^2} [(x^2 - 1)^2 \cdot x] = \\ &= \frac{1}{8} \frac{d}{dx} \left[ \frac{d}{dx} (x^2 - 1)^2 \cdot x + (x^2 - 1)^2 \cdot \frac{d}{dx} (x) \right] = \frac{1}{8} \frac{d}{dx} (4x^4 - 4x^2 + x^4 - 2x^2 + 1) = \\ &= \frac{1}{8} \frac{d}{dx} (5x^4 - 6x^2 + 1) = \frac{1}{8} (20x^3 - 12x) = \frac{1}{2} (5x^3 - 3x). \end{aligned}$$

Аналогично выводятся другие элементы рассматриваемого базиса. Явные выражения первых восьми базисных функций имеют вид:

$$\begin{aligned} L_0(x) &= 1; \quad L_1(x) = x; \quad L_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1); \quad L_3(x) = \frac{1}{2}(5x^3 - 3x); \\ L_4(x) &= \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3); \quad L_5(x) = \frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x); \end{aligned} \quad (8)$$

$$L_6(x) = \frac{1}{16}(231x^6 - 315x^4 + 105x^2 - 5); \quad L_7(x) = \frac{1}{16}(429x^7 - 693x^5 + 315x^3 - 35x).$$

Ортогональность на интервале  $[-1; 1]$  означает [10], что попарные скалярные произведения различных элементов классического базиса Лежандра равны 0, а квадрат нормированного значения элемента [см. уравнение (4)] составляет  $2/(2k+1)$ :

$$(L_k, L_s) = \int_{-1}^1 L_k(x)L_s(x)dx = \begin{cases} 0, & k \neq s; \\ \frac{2}{2k+1}, & k = s. \end{cases} \quad (9)$$

Учитывая (4) и (9), выражение (3) для определения коэффициентов Фурье в случае использования базиса Лежандра принимает вид

$$c_k = \frac{2k+1}{2} \int_{-1}^1 f(x)L_k(x)dx. \quad (10)$$

Для того, чтобы выполнять разложение траекторий выходных переменных СТС в частичные суммы ряда Фурье по базису Лежандра (ряд Фурье – Лежандра), необходим инструментарий для задания требуемой области ортогональности. Очевидно, что регистрация траектории на интервале  $T$  означает, что он имеет левую  $t_0$  и правую  $t_r$  границы на оси времени (начальный и конечный моменты регистрации):

$$T = t_r - t_0, \quad t_r > t_0, \quad t_0 \geq 0. \quad (11)$$

С целью получения требуемой области ортогональности базиса Лежандра предлагается следующее линейное преобразование:

$$t = \frac{t_r + t_0}{2} + \frac{t_r - t_0}{2}x, \quad (12)$$

где  $t$  – переменная, имеющая смысл текущего времени,  $t_0 \leq t \leq t_r$ .

Действительно, новая переменная  $t$  изменяется на интервале  $[t_0; t_r]$  при изменении переменной  $x$  на  $[-1; 1]$ . Справедливость данного утверждения видна из подстановки граничных значений  $x$  в равенство (12):

$$\frac{t_r + t_0}{2} + \frac{t_r - t_0}{2}(-1) = \frac{1}{2}(t_r + t_0 - t_r + t_0) = t_0; \quad \frac{t_r + t_0}{2} + \frac{t_r - t_0}{2} \cdot 1 = \frac{1}{2}(t_r + t_0 + t_r - t_0) = t_r.$$

Таким образом, переменная  $x$  классического базиса Лежандра выражается через текущее время  $t$  формулой

$$x = \frac{t - \frac{1}{2}(t_r + t_0)}{\frac{1}{2}(t_r - t_0)} = \frac{2t - t_0 - t_r}{t_r - t_0}, \quad (13)$$

что непосредственно следует из (12).

В дальнейшем базис, ортогональный на произвольном интервале  $[t_0; t_r]$ , называется модифицированным базисом Лежандра. Начальные элементы модифицированного базиса формируются путем подстановки правой части (13) в выражения (8), которые входят в классический базис:

$$L_0(t) = 1; \quad L_1(t) = \frac{2t - t_0 - t_r}{t_r - t_0}; \quad L_2(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{3(2t - t_0 - t_r)^2}{(t_r - t_0)^2} - 1 \right);$$

$$L_3(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{5(2t - t_0 - t_r)^3}{(t_r - t_0)^3} - \frac{3(2t - t_0 - t_r)}{t_r - t_0} \right); \quad L_4(t) = \frac{1}{8} \left( \frac{35(2t - t_0 - t_r)^4}{(t_r - t_0)^4} - \frac{30(2t - t_0 - t_r)^2}{(t_r - t_0)^2} + 3 \right);$$

$$\begin{aligned}
 L_5(t) &= \frac{1}{8} \left( \frac{63(2t-t_0-t_r)^5}{(t_r-t_0)^5} - \frac{70(2t-t_0-t_r)^3}{(t_r-t_0)^3} + \frac{15(2t-t_0-t_r)}{t_r-t_0} \right); \\
 L_6(t) &= \frac{1}{16} \left( \frac{231(2t-t_0-t_r)^6}{(t_r-t_0)^6} - \frac{315(2t-t_0-t_r)^4}{(t_r-t_0)^4} + \frac{105(2t-t_0-t_r)^2}{(t_r-t_0)^2} - 5 \right); \\
 L_7(t) &= \frac{1}{16} \left( \frac{429(2t-t_0-t_r)^7}{(t_r-t_0)^7} - \frac{693(2t-t_0-t_r)^5}{(t_r-t_0)^5} + \frac{315(2t-t_0-t_r)^3}{(t_r-t_0)^3} - \frac{35(2t-t_0-t_r)}{t_r-t_0} \right).
 \end{aligned} \tag{14}$$

Условие вида (9) для модифицированного базиса Лежандра проверяется вычислением попарных скалярных произведений его элементов (14), например:

$$\begin{aligned}
 (L_1, L_1) &= \int_{t_0}^{t_r} \left( \frac{2t-t_0-t_r}{t_r-t_0} \right) \left( \frac{2t-t_0-t_r}{t_r-t_0} \right) dt = \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \int_{t_0}^{t_r} (2t-(t_0+t_r))^2 dt = \\
 &= \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \int_{t_0}^{t_r} (4t^2 - 4t(t_0+t_r) + (t_0+t_r)^2) dt = \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \left( \frac{4}{3}t^3 - \frac{4}{2}(t_0+t_r)t^2 + (t_0+t_r)^2t \right) \Big|_{t_0}^{t_r} = \\
 &= \frac{1}{(t_r-t_0)^2} \left( \frac{4}{3}(t_r^3 - t_0^3) - 2(t_0+t_r)(t_r^2 - t_0^2) + (t_0+t_r)^2(t_r - t_0) \right) = \\
 &= \frac{t_r-t_0}{(t_r-t_0)^2} \left( \frac{4}{3}(t_r^2 + t_0t_r + t_0^2) - (t_0+t_r)^2 \right) = \frac{1}{t_r-t_0} \left( \frac{4}{3}t_r^2 + \frac{4}{3}t_0t_r + \frac{4}{3}t_0^2 - t_0^2 - 2t_0t_r - t_r^2 \right) = \\
 &= \frac{1}{3(t_r-t_0)} (t_r^2 - 2t_0t_r + t_0^2) = \frac{(t_r-t_0)^2}{3(t_r-t_0)} = \frac{1}{3}(t_r-t_0).
 \end{aligned}$$

Аналогично находятся:

$$\begin{aligned}
 (L_0, L_0) &= t_r - t_0; \quad (L_2, L_2) = \frac{1}{5}(t_r - t_0); \quad (L_3, L_3) = \frac{1}{7}(t_r - t_0); \quad (L_4, L_4) = \frac{1}{9}(t_r - t_0); \quad (L_5, L_5) = \frac{1}{11}(t_r - t_0); \\
 (L_6, L_6) &= \frac{1}{13}(t_r - t_0); \quad (L_7, L_7) = \frac{1}{15}(t_r - t_0); \quad (L_k, L_s) = 0, \quad k = \overline{0,7}, \quad s = \overline{0,7}, \quad k \neq s.
 \end{aligned}$$

Из полученных результатов просматривается закономерность, которую можно записать как

$$(L_k, L_s) = \int_{t_0}^{t_r} L_k(t)L_s(t)dt = \begin{cases} 0, & k \neq s; \\ \frac{t_r-t_0}{2k+1}, & k = s. \end{cases} \tag{15}$$

Выражение (15) есть аналог (9) применительно к модифицированному базису. Следовательно, соотношение (10) трансформируется с учетом (15) и обретает вид

$$c_k = \frac{2k+1}{t_r-t_0} \int_{t_0}^{t_r} f(t)L_k(t)dt. \tag{16}$$

Далее величины (16) называются коэффициентами Фурье – Лежандра, а частичная сумма порядка  $m$  ряда с таким же названием будет фиксироваться равенством

$$S^m = \sum_{k=0}^m c_k L_k \tag{17}$$

по аналогии с выражением (2).

Необходимо определить мощность множества слагаемых, которые должны быть включены в частичную сумму (17) для обеспечения требуемой результативности контроля технического состояния ТС. В рамках настоящей статьи рассматривается усовершенствованный по сравнению с начальными разработками [12, 13] способ численной оценки качества приближения траекторий частичными суммами ряда Фурье.

Пусть

$$\sum_{k=0}^{m-1} c_k L_k, \quad \sum_{k=0}^m c_k L_k, \quad \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \quad (18)$$

– это три частичные суммы вида (17), порядок которых отличается на единицу при переходе от предыдущей суммы к последующей и наоборот. Для сравнения отклонений смежных частичных сумм (т. е. предыдущего и последующего порядка) от траектории предлагаются величины:

$$\delta_{m-1,m} = \frac{\left| \left\| f - \sum_{k=0}^{m-1} c_k L_k \right\|^2 - \left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 \right|}{\left\| f - \sum_{k=0}^{m-1} c_k L_k \right\|^2} \cdot 100; \quad \delta_{m,m+1} = \frac{\left| \left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 - \left\| f - \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \right\|^2 \right|}{\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2} \cdot 100. \quad (19)$$

Относительные величины (19) показывают, насколько процентов отличаются отклонения смежных частичных сумм от траектории. Затем формируется двухкомпонентное условие

$$\delta_{m-1,m} \leq \delta \ \& \ \delta_{m,m+1} \leq \delta, \quad (20)$$

которое заключается в том, что два последних неравенства выполняются одновременно.

В выражении (20) величина  $\delta$  – максимально допустимое относительное отклонение, которое задается предварительно при решении конкретной задачи. В общем случае  $\delta$  целесообразно принимать сопоставимой с метрологическими и методическими погрешностями регистрации траектории на исследуемой системе [14].

Если при разложении траектории условие (20) выполняется, то в качестве контролируемых параметров принимаются коэффициенты Фурье – Лежандра из частичной суммы:

– порядка  $m + 1$ , если имеет место неравенство

$$\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 > \left\| f - \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \right\|^2;$$

– порядка  $m$  при обратном неравенстве

$$\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 \leq \left\| f - \sum_{k=0}^{m+1} c_k L_k \right\|^2. \quad (21)$$

В случае, когда справедливо неравенство (21), переход к частичной сумме порядка  $m + 1$  нецелесообразен, это означало бы увеличение погрешностей вычислений из-за повышения размерности математических конструкций. Тем самым снижается качество аппроксимации.

При не выполнении (20) количество слагаемых в частичных суммах (18) последовательно увеличивается на единицу и при очередном увеличении проверяется данное условие. Как только частичные суммы (18) начинают удовлетворять неравенствам (20), процесс удлинения сумм заканчивается. Это указывает, что найдено множество контролируемых параметров в соответствующей контрольной точке. В коэффициентах Фурье – Лежандра, не попадающих в данное множество, сосредоточены пренебрежимо малые сведения о поведении траектории на множестве  $T$ .

В более ранних версиях предложенного способа [12, 13] сравнивались две смежные частичные суммы вида (17) и проверялось одно из неравенств, входящих в условие (20). Дальнейший опыт разработки и применения математического обеспечения контроля технического состояния СТС свидетельствует о наличии ситуаций, когда неравенство

$$\delta_{m-1,m} \leq \delta \quad (22)$$

выполняется, а при последующем увеличении порядка частичной суммы на единицу положение меняется:

$$\delta_{m,m+1} > \delta. \quad (23)$$

Если сформировать множество контролируемых параметров только на основании (22), оно не в полной мере отражает поведение траектории на интервале (11). Это в конечном счете может отрицательно сказываться на достоверности контроля технического состояния СТС. Пример преобразования траектории давления воздуха, который приводится ниже, показывает такую ситуацию.

### ЧИСЛЕННАЯ ПРОЦЕДУРА ПОИСКА ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Траектории физических величин обычно претерпевают сложные изменения на временном интервале (11), им невозможно придать аналитический вид. Поэтому требуется формировать приближенные соотношения при обработке траекторий, которые базируются на методах теории вычислительных процессов [15].

Для отыскания интегралов, входящих в (16), может использоваться либо формула Симпсона, либо формула трапеций. В последнем случае выражения имеют более простую структуру, но в то же время необходимая точность вычислений обеспечивается. По этой причине дальнейшие рассуждения основываются на применении формулы трапеций, которая адаптируется к рассматриваемой задаче в форме

$$\int_{t_0}^{t_r} f(t)L_k(t)dt \approx \frac{t_r - t_0}{r} \left( \frac{f(t_0)L_k(t_0) + f(t_r)L_k(t_r)}{2} + f(t_1)L_k(t_1) + f(t_2)L_k(t_2) + \dots + f(t_{r-1})L_k(t_{r-1}) \right), \quad (24)$$

где  $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{r-1} < t_r$  – упорядоченные по возрастанию моменты времени на интервале (11);

$f(t_0), f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_{r-1}), f(t_r)$  – значения траектории в указанные моменты;

$r$  – мощность множества отрезков между моментами времени.

Из выражений (16) и (24) следует, что коэффициенты Фурье – Лежандра находятся по формуле

$$c_k = \frac{2k+1}{r} \left( \frac{f(t_0)L_k(t_0) + f(t_r)L_k(t_r)}{2} + \sum_{l=1}^{r-1} f(t_l)L_k(t_l) \right). \quad (25)$$

С учетом (17) значения частичной суммы порядка  $m$  ряда Фурье – Лежандра в граничных точках временных отрезков находятся из соотношения

$$S_l^m = \sum_{k=0}^m c_k L_k(t_l), \quad l = \overline{0, r}. \quad (26)$$

Предполагая среднеквадратичную сходимость [см. (5)], отклонение частичной суммы (17) от траектории определяется выражением

$$\left\| f - \sum_{k=0}^m c_k L_k \right\|^2 = \sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2. \quad (27)$$

Из (27) вытекает, что относительные величины (19) принимают вид

$$\delta_{m-1,m} = \left| \frac{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^{m-1})^2 - \sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2}{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^{m-1})^2} \right| \cdot 100;$$

$$\delta_{m,m+1} = \left| \frac{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2 - \sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^{m+1})^2}{\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2} \right| \cdot 100. \quad (28)$$

### ОБРАБОТКА МАССИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В компрессорном ресивере системы холодоснабжения зарегистрирована траектория давления  $P$  воздуха на интервале времени 4 минуты (рис. 1). На основе разложения данной траектории в частичные суммы ряда Фурье – Лежандра необходимо получить множество контролируемых параметров системы. Максимально допустимое относительное отклонение  $\delta$  в условии (20) принимается равным 10%.

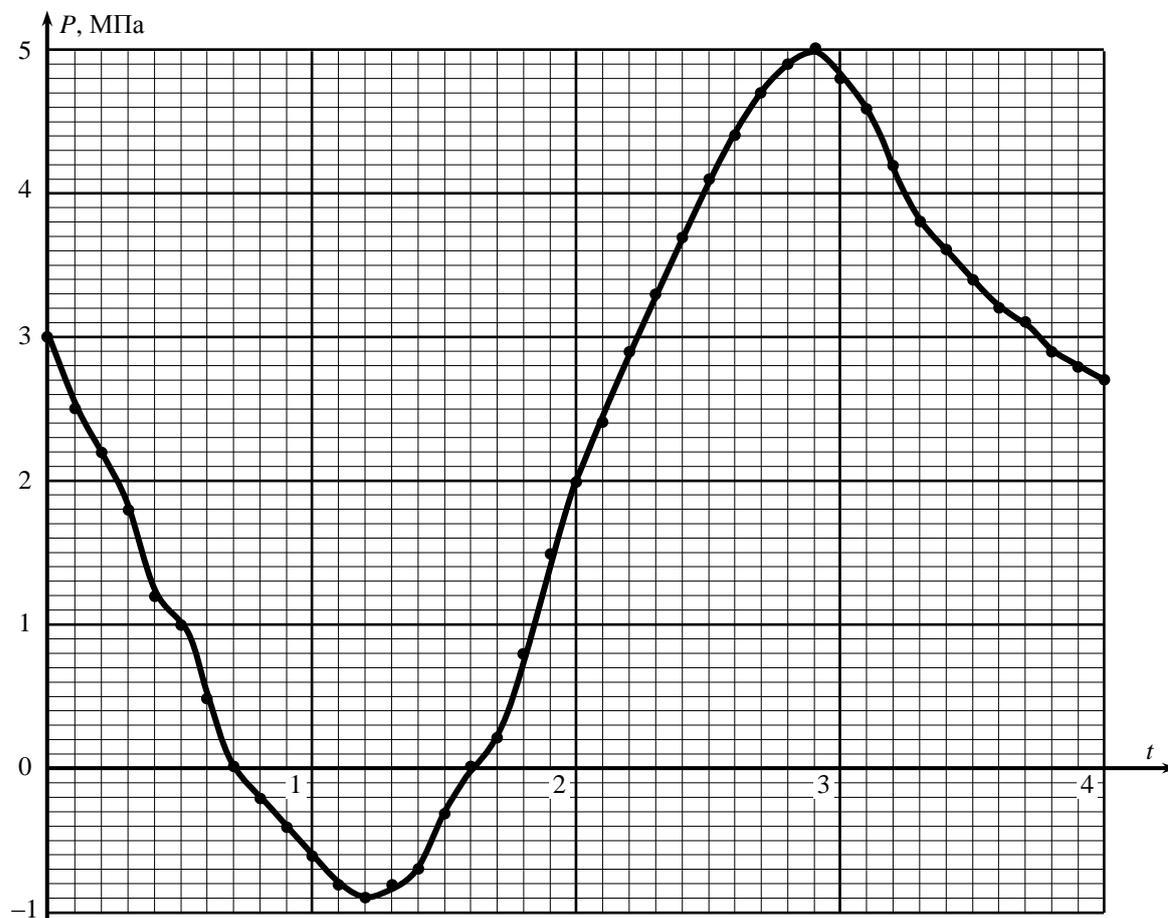


Рис. 1. Траектория давления воздуха

Если считать начальный момент регистрации как ноль на оси времени, то областью определения данной траектории является интервал вида (11):

$$T = t_r - t_0 = 4 - 0 = 4. \quad (29)$$

С целью охвата всех характерных значений траектории мощность множества временных отрезков на интервале (29) принимается равным 40 ( $r = 40$ ). Выражение (25) для вычисления коэффициентов Фурье – Лежандра в данном случае приобретает следующий вид:

$$c_k = \frac{2k+1}{40} \left( \frac{P(t_0)L_k(t_0) + P(t_{40})L_k(t_{40})}{2} + \sum_{l=1}^{39} P(t_l)L_k(t_l) \right). \quad (30)$$

Границы выделенных временных отрезков и значения  $P_l$  давления в граничных точках показаны в табл. 1. Значения  $P_l$  сняты непосредственно с траектории (рис. 1).

Сведения из табл. 1 необходимы для вычисления коэффициентов Фурье – Лежандра.

Таблица 1

**Исходные данные для определения коэффициентов частичных сумм  
ряда Фурье – Лежандра**

Границы $t_l$ временных отрезков		Значения $P(t_l)$	Границы $t_l$ временных отрезков		Значения $P(t_l)$
Обозначение	Численное значение		Обозначение	Численное значение	
$t_0$	0,0	3,0	$t_{21}$	2,1	2,4
$t_1$	0,1	2,5	$t_{22}$	2,2	2,9
$t_2$	0,2	2,2	$t_{23}$	2,3	3,3
$t_3$	0,3	1,8	$t_{24}$	2,4	3,7
$t_4$	0,4	1,2	$t_{25}$	2,5	4,1
$t_5$	0,5	1,0	$t_{26}$	2,6	4,4
$t_6$	0,6	0,5	$t_{27}$	2,7	4,7
$t_7$	0,7	0,0	$t_{28}$	2,8	4,9
$t_8$	0,8	-0,2	$t_{29}$	2,9	5,0
$t_9$	0,9	-0,4	$t_{30}$	3,0	4,8
$t_{10}$	1,0	-0,6	$t_{31}$	3,1	4,6
$t_{11}$	1,1	-0,8	$t_{32}$	3,2	4,2
$t_{12}$	1,2	-0,9	$t_{33}$	3,3	3,8
$t_{13}$	1,3	-0,8	$t_{34}$	3,4	3,6
$t_{14}$	1,4	-0,7	$t_{35}$	3,5	3,4
$t_{15}$	1,5	-0,3	$t_{36}$	3,6	3,2
$t_{16}$	1,6	0,0	$t_{37}$	3,7	3,1
$t_{17}$	1,7	0,2	$t_{38}$	3,8	2,9
$t_{18}$	1,8	0,8	$t_{39}$	3,9	2,8
$t_{19}$	1,9	1,5	$t_{40}$	4,0	2,7
$t_{20}$	2,0	2,0			

Так, применительно к коэффициенту  $c_4$  выражение (16) получает написание

$$c_4 = \frac{9}{4} \int_0^4 P(t)L_4(t)dt. \quad (31)$$

Из (14) выводится формальная конструкция для полинома  $L_4(t)$ , являющегося элементом модифицированного базиса Лежандра:

$$L_4(t) = \frac{1}{8} \left( \frac{35(2t-4)^4}{4^4} - \frac{30(2t-4)^2}{4^2} + 3 \right) = \frac{1}{128} (35t^4 - 280t^3 + 720t^2 - 640t + 128). \quad (32)$$

Имея в виду (32), выражение (31) записывается как

$$c_4 = \frac{9}{512} \int_0^4 (35t^4 - 280t^3 + 720t^2 - 640t + 128) P(t) dt. \quad (33)$$

Формула (33) может непосредственно использоваться для вычисления  $c_4$ , если известен явный вид зависимости  $P(t)$  давления воздуха в ресивере от времени. В действительности известны лишь отдельные значения давления (см. табл. 1), поэтому найти  $c_4$  возможно только из соотношения (30):

$$c_4 = \frac{9}{40} \left( \frac{P(0)L_4(0) + P(4)L_4(4)}{2} + \sum_{l=1}^{39} P(t_l)L_4(t_l) \right). \quad (34)$$

В табл. 2 приведены значения  $L_4(t_l)$ ,  $l = \overline{0, 40}$  полинома (32), которые необходимы для подстановки в (34).

Таблица 2

**Значения  $L_4(t_l)$  элемента  $L_4(t)$  модифицированного базиса Лежандра**

$t_l$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$L_4(t_l)$	1,0000	0,5541	0,2080	-0,0506	-0,2330	-0,3501	-0,4121
$t_l$	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$L_4(t_l)$	-0,4284	-0,4080	-0,3591	-0,2891	-0,2050	-0,1130	-0,0187
$t_l$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$L_4(t_l)$	0,0729	0,1577	0,2320	0,2929	0,3380	0,3657	0,3750
$t_l$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
$L_4(t_l)$	0,3657	0,3380	0,2929	0,2320	0,1577	0,0729	-0,0187
$t_l$	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
$L_4(t_l)$	-0,1130	-0,2050	-0,2891	-0,3591	-0,4080	-0,4284	-0,4121
$t_l$	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	
$L_4(t_l)$	-0,3501	-0,2330	-0,0506	0,2080	0,5541	1,0001	

Из табл. 2 видно, если взять точку  $t_{11} = 1,1$  получается следующее значение полинома:

$$L_4(t_{11}) = \frac{1}{128} (35t_{11}^4 - 280t_{11}^3 + 720t_{11}^2 - 640t_{11} + 128) = -0,2050.$$

Учитывая данные табл. 1 и табл. 2, по формуле (34) вычисляется искомая величина:

$$c_4 = \frac{9}{40} \left( \frac{3 \cdot 1 + 2,7 \cdot 1,0001}{2} + (2,5 \cdot 0,5541 + 2,2 \cdot 0,2080 + 1,8(-0,0506) + \dots + 2,8 \cdot 0,5541) \right) = 0,2599.$$

Таким же образом определяются другие коэффициенты Фурье – Лежандра, значения восьми начальных коэффициентов приведены в табл. 3.

В соответствии с (17) отыскиваются выражения для частичных сумм. Например, частичная сумма седьмого порядка имеет конфигурацию

$$S^7 = \sum_{k=0}^7 c_k L_k(t) = c_0 L_0(t) + c_1 L_1(t) + c_2 L_2(t) + c_3 L_3(t) + c_4 L_4(t) + c_5 L_5(t) + c_6 L_6(t) + c_7 L_7(t). \quad (35)$$

Таблица 3

## Значения коэффициентов Фурье – Лежандра

$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$
2,0913	2,1709	0,5436	-3,4852	0,2599	1,4757	0,2798	-0,3019

Тогда значения частичной суммы (35) в граничных точках временных отрезков могут вычисляться как

$$S_l^7 = \sum_{k=0}^7 c_k L_k(t_l), \quad l = \overline{0, 40}. \quad (36)$$

Однако, целесообразно получить все частичные суммы в форме стандартных алгебраических полиномов переменной  $t$  и на данной основе находить величины (36). Такие вычисления будут более конкретными и обозримыми. Далее в качестве примера искомое соотношение воспроизводится для частичной суммы (35).

Вначале из (14) выводятся базисные полиномы, содержащиеся в (35), как это реализовано в (32):

$$\begin{aligned} L_0(t) &= 1; \quad L_1(t) = \frac{1}{2}(t-2); \quad L_2(t) = \frac{1}{8}(3t^2-12t+8); \quad L_3(t) = \frac{1}{16}(5t^3-30t^2+48t-16); \\ L_4(t) &= \frac{1}{256}(63t^5-630t^4+2240t^3-3360t^2+1920t-256); \\ L_5(t) &= \frac{1}{1024}(231t^6-2772t^5+12600t^4-26880t^3+26880t^2-10752t+1024); \\ L_6(t) &= \frac{1}{2048}(429t^7-6006t^6+33264t^5-92400t^4+134400t^3-96768t^2+28672t-2048). \end{aligned} \quad (37)$$

Затем при подстановке в (35) выражений (37) и значений коэффициентов из табл.3 частичная сумма седьмого порядка приобретает форму полинома

$$S^7 = -0,0632t^7 + 0,9485t^6 - 5,2977t^5 + 13,506t^4 - 15,913t^3 + 10,456t^2 - 7,5915t + 3,3162. \quad (38)$$

Соотношение (27) для отклонения частичной суммы от траектории принимает вид

$$\sum_{l=0}^r (f(t_l) - S_l^m)^2 = \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^m)^2. \quad (39)$$

В табл. 4 приведены значения частичной суммы седьмого порядка, полученные из (38), а также отклонения данной суммы от траектории в граничных точках временных отрезков.

При  $t_{11} = 1,1$ , как следует из табл.4, имеет место значение

$$\begin{aligned} S_{11}^7 &= -0,0632t_{11}^7 + 0,9485t_{11}^6 - 5,2977t_{11}^5 + 13,506t_{11}^4 - 15,913t_{11}^3 + 10,456t_{11}^2 - 7,5915t_{11} + 3,3162 = \\ &= -0,7636. \end{aligned}$$

Результаты вычислений (табл. 4) и соотношение (39) являются основой для поиска отклонения частичной суммы седьмого порядка от траектории:

$$\sum_{l=0}^{40} (P_l - S_l^7)^2 = 1,3394.$$

Подобные расчеты выполнены для частичных сумм более низкого порядка:

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^1)^2 &= 86,517; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^2)^2 = 83,693; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^3)^2 = 10,584; \\ \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^4)^2 &= 10,362; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^5)^2 = 1,3567; \quad \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^6)^2 = 1,2356. \end{aligned}$$

Таблица 4

**Значения частичной суммы седьмого порядка и ее отклонений от траектории  
в выбранных моментах времени**

$l$	$S_l^7$	$(P(t_l) - S_l^7)^2$	$l$	$S_l^7$	$(P(t_l) - S_l^7)^2$
0	3,3162	0,1000	21	2,3836	0,0003
1	2,6470	0,0216	22	2,9190	0,0004
2	2,1088	0,0083	23	3,4232	0,0152
3	1,6473	0,0233	24	3,8773	0,0314
4	1,2294	0,0009	25	4,2646	0,0271
5	0,8382	0,0262	26	4,5717	0,0295
6	0,4692	0,0010	27	4,7889	0,0079
7	0,1262	0,0159	28	4,9112	0,0001
8	-0,1811	0,0004	29	4,9389	0,0037
9	-0,4405	0,0016	30	4,8777	0,0060
10	-0,6387	0,0015	31	4,7390	0,0193
11	-0,7636	0,0013	32	4,4198	0,0483
12	-0,8052	0,0090	33	4,0026	0,0411
13	-0,7568	0,0019	34	3,8343	0,0549
14	-0,6155	0,0071	35	3,6254	0,0508
15	-0,3825	0,0068	36	3,4489	0,0619
16	-0,0633	0,0040	37	3,3582	0,0667
17	0,3328	0,0176	38	3,1849	0,0811
18	0,7926	0,0001	39	3,2164	0,1734
19	1,3002	0,0399	40	3,2526	0,3054
20	1,8372	0,0265			

Относительные изменения отклонений частичных сумм предыдущего и последующего порядка от траектории в соответствии с (28):

$$\delta_{1,2} = \left| \frac{\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^1)^2 - \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^2)^2}{\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^1)^2} \right| \cdot 100 = \frac{86,517 - 83,693}{86,517} \cdot 100 = 3,3\%; \quad (40)$$

$$\delta_{2,3} = 87,4\%; \quad \delta_{3,4} = 2,1\%; \quad \delta_{4,5} = 86,9\%; \quad \delta_{5,6} = 8,9\%; \quad \delta_{6,7} = 7,7\%.$$

Результаты (40) свидетельствуют, что на частичных суммах пятого, шестого и седьмого порядка двухкомпонентное условие (20) выполняется:

$$\delta_{5,6} < 10\% \ \& \ \delta_{6,7} < 10\% . \quad (41)$$

При этом абсолютное значение отклонения частичной суммы седьмого порядка от траектории превышает аналогичную величину для частичной суммы шестого порядка (справедливо неравенство (21)):

$$\sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^6)^2 < \sum_{l=0}^{40} (P(t_l) - S_l^7)^2 \quad (42)$$

Из (41) и (42) следует, что в качестве аппроксимирующего соотношения для траектории (см. рис. 1) нужно принимать частичную сумму ряда Фурье – Лежандра шестого порядка:

$$S^6 = 0,0631t^6 - 0,3942t^5 - 0,1148t^4 + 3,8992t^3 - 3,8092t^2 - 3,3649t + 3,0143. \quad (43)$$

Формула (43) получена также, как и (38).

Таким образом, из табл. 3 видно, что вектор (1) при разложении траектории давления воздуха (см. рис. 1) приобретает следующее начертание:

$$Y_{(7)} = (2,0913, 2,1709, 0,5436, -3,4852, 0,2599, 1,4757, 0,2798)^T.$$

Необходимо заметить, что относительные различия частичных сумм первого и второго, а также третьего и четвертого порядка ряда Фурье – Лежандра [см. (40)] условию (22) удовлетворяют. При этом и неравенство (23) в обоих случаях тоже выполняется – относительные различия частичных сумм второго и третьего, четвертого и пятого порядка превышают допустимую величину  $\delta = 10\%$ . Указанный факт говорит о преимуществе предложенного в данной работе способа определения размерности вектора (1) по сравнению с предыдущими исследованиями [12, 13]. Руководствуясь ими, можно принять неточное решение об аппроксимирующем соотношении для траектории давления воздуха в виде частичных сумм второго или четвертого порядка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования процессов интервального контроля состояния специальных технических систем РКК позволили:

- обосновать возможность применения ортогональных алгебраических базисов для преобразования траекторий выходных переменных СТС с целью получения множества контролируемых параметров;

- выполнить аппроксимацию траекторий частичными суммами ряда Фурье на основе ортогонального базиса Лежандра, модифицированного применительно к временным интервалам контроля технического состояния СТС любой продолжительности;

- предложить усовершенствованный способ определения мощности множества контролируемых параметров в виде коэффициентов разложения траекторий в частичные суммы ряда Фурье-Лежандра;

- разработать численную процедуру поиска значений контролируемых параметров СТС при разложении траекторий, которые не могут быть представлены в аналитическом виде.

Усовершенствование способа задания мощности множества контролируемых параметров состоит в том, что обосновано двухкомпонентное условие, при выполнении которого завершается процесс удлинения частичных сумм ряда Фурье – Лежандра. При этом сформированное множество контролируемых параметров включает всю значимую информацию об особенностях поведения траектории на интервале регистрации.

Процедура отыскания значений контролируемых параметров опирается на методы определения интегралов, представленные в теории вычислений.

Показаны результаты обработки экспериментальных исследований изменения одного из выходных параметров системы холодоснабжения, которые демонстрируют предложенные методические и математические подходы к получению объективных сведений о техническом состоянии СТС.

## Список используемых источников

1. Лобан А. В. Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов. – Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 146 с.
2. A review of model based and data driven methods targeting hardware systems diagnostics / С. Skliros [et al.] // Diagnostyka. – 2019. – Vol. 20(1). – P. 3–21.

3. A novel intelligent fault diagnosis method of rotating machinery based on deep learning and PSO-SVM / P. Shi [et al.] // *Journal of Vibroengineering*. – 2017. – Vol. 19(8). – P. 5932–5946.
4. Поляков В. А. Основы технической диагностики. – М.: Инфра-М, 2014. – 118 с.
5. Дмитриев А. К., Мальцев П. А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
6. Зорич В. А. Математический анализ: в 2 ч. – М.: МЦНМО, 2012. – Ч. 1. – 674 с.
7. Якимов В. Н. Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // *Известия Самарского центра РАН*. – 2016. – Т. 18, № 4(7). – С. 1346–1353.
8. Сеньченков В. И. Модели, методы и алгоритмы анализа технического состояния. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 377 с.
9. Сеньченков В. И., Абсалямов Д. Р., Авсюкевич Д. А. Задание множества диагностических параметров системы на основе теории функциональных пространств // *Труды СПИИРАН*. – 2019. – Т. 18(4). – С. 949–975.
10. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 572 с.
11. *Muscat Jo*. Functional Analysis: An Introduction to Metric Spaces, Hilbert Spaces, and Banach Algebras. – Springer, 2014. – 420 p.
12. Методика определения совокупности коэффициентов Фурье при диагностировании агрегатов роторного типа / П. А. Грушковский [и др.] // *Контроль. Диагностика*. – 2018. – № 11. – С. 60–63.
13. Сеньченков В. И. Математический аппарат диагностирования сложных технических систем // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2016. – Т. 59, № 7. – С. 547–557.
14. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
15. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – 9-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 636 с.

Ю. П. Анисимов,  
*кандидат технических наук, доцент*  
Военная академия материально-технического обеспечения  
имени генерала армии А. В. Хрулева, г. Санкт-Петербург.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Современные требования к качеству сбрасываемых сточных вод вызывают необходимость разработки и внедрения совершенно новых методов очистки сточных вод. В виду сложности эксплуатации современных технологий обработки воды необходимо внедрение эксплуатационных моделей и систем управления канализационных очистных сооружений. В статье представлена математическая модель процессов биологической очистки сточных вод, позволяющая прогнозировать и управлять работой сооружений биологической очистки сточных вод.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, аэротенк, очистка сточных вод.

Современное законодательство РФ [1–4] обязывает обеспечить переход на технологическое нормирование качества коммунальных сточных вод на основе наилучших доступных технологий (НДТ) для объектов централизованных систем водоотведения поселений, городских округов, относящихся к 1-й категории негативного воздействия на окружающую среду, в обязательном порядке (остальные объекты – в рекомендательном). Переход на технологическое нормирование предусматривает в том числе и внедрение системы автоматического контроля технологических показателей очистки коммунальных сточных вод для оптимизации процесса управления режимом эксплуатации канализационных очистных сооружений. И, как следствие, – изменение порядка выплат за негативное воздействие на водные объекты, т. е. переход от расчетных методик оценки вредного воздействия к оценке реальных объемов сбрасываемых загрязняющих веществ в водные объекты.

Проведенный анализ состояния канализационных очистных сооружений (КОС) объектов Минобороны России [5] показал, что требования законодательства РФ могут быть выполнены не в полной мере, поскольку основное количество КОС спроектировано в 1960–1970 гг. и глубокой модернизации за период эксплуатации не подвергалось. Заложенные в них инженерные решения и оборудование не всегда позволяют обеспечить необходимое качество сбрасываемых сточных вод в водные объекты. При этом важно отметить, что существующие сооружения на объектах Минобороны России могут быть подвергнуты глубокой модернизации и, что самое главное, внедрению на них современных технологий, соответствующих всем требованиям природоохранного законодательства. Поскольку ярко выраженные тенденции урбанизации территории Российской Федерации и связанное с этим значительное увеличение расходов сточных вод в местах расположения военных городков, оборудованных собственными КОС, не проявляются, то таким образом, строительных объемов сооружений КОС достаточно для внедрения современных технологий обработки сточных вод.

Выявленные факторы [6], влияющие на качество очистки сточных вод, позволяют выявить направления повышения качества очистки сточных вод. Одним из направлений является глубокая модернизация КОС с внедрением НДТ. Исследования показывают, что без разработки математических моделей и внедрения их в эксплуатационные модели современные требования к качеству сбрасываемых сточных вод недостижимы.

Основные подходы к моделированию работы для различных моделей активного ила аэротенке приведены в [7–9]. Исходя из требований к качеству очистки сточных вод и условий эксплуатации, для объектов Минобороны России наиболее подходит технология с примене-

нием схемы биоблока КОС с глубоким удалением азота и фосфора Кейптаунского университета (UCT-процесс) рис. 1.

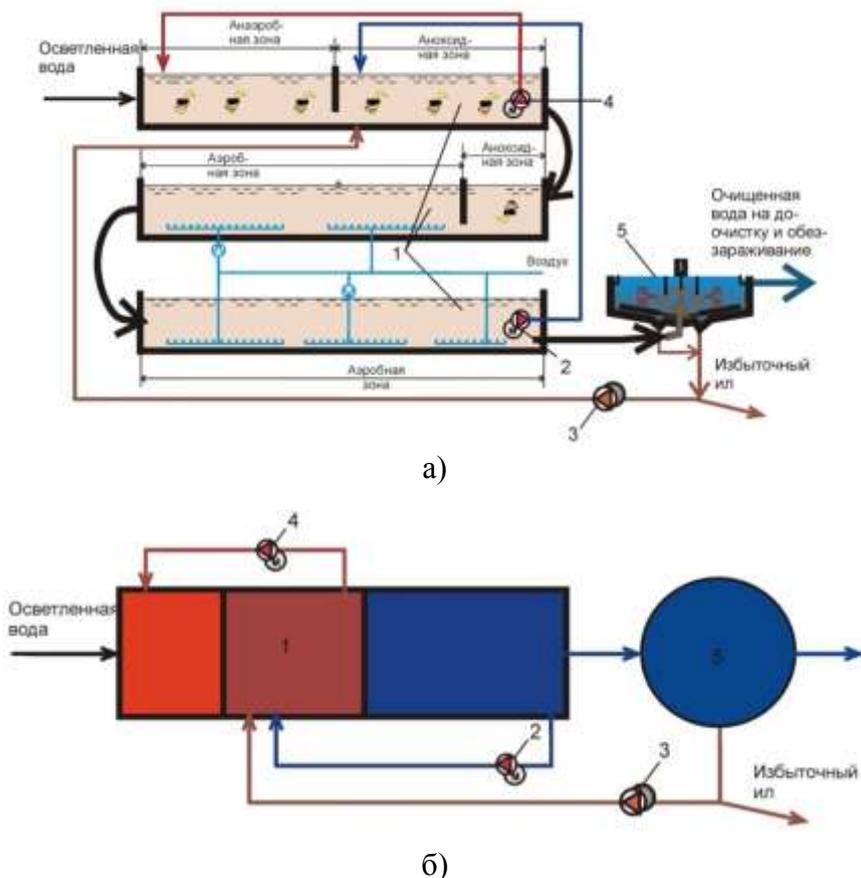


Рис. 1. Схемы очистки сточных вод по технологии Кейптаунского университета (UCT): а – технологическая; б – принципиальная; 1 – секции аэротенков; 2 – насосная станция рециркуляции нитратосодержащей иловой смеси (нитратный рецикл); 3 – насосная станция рециркуляции возвратного ила; 4 – насосная станция рециркуляции денитрифицированной иловой смеси (аноксидный рецикл); 5 – вторичные отстойники

Для построения математической модели в соответствии с предложенной схемой очистки сточных вод выделим зоны с различными способами обработки воды – анаэробную, аноксидную и аэробную.

Концентрации веществ в первых компонентах первых двух зон определяются с использованием уравнений баланса:

– для анаэробной

$$C_1^{\text{ана}} = \frac{Q_{\text{вх}}C_{\text{вх}} + Q_{R1}C_{R1}}{Q_{\text{вх}} + Q_{R1}},$$

– для аноксидной

$$C_1^{\text{ано}} = \frac{(Q_{\text{вх}} + Q_{R1})C_n^{\text{ана}} + Q_{R2}C_{R2} + Q_{R3}C_{R3}}{Q_{\text{вх}} + Q_{R1} + Q_{R2} + Q_{R3}},$$

где  $Q_{\text{вх}}, Q_{R1}, Q_{R2}, Q_{R3}$  – расходы, соответственно поступающей сточной воды, нитратного рецикла, возвратного ила аноксидного рецикла;

$C_{\text{вх}}, C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}$  – концентрации веществ, соответственно поступающей сточной воды, нитратного рецикла, возвратного ила аноксидного рецикла.

Для аэробной зоны в качестве концентраций веществ в первой компоненте принимаются выходные концентрации последней компоненты аноксидной зоны:

$$C_1^{\text{окс}} = C_n^{\text{ано}}.$$

Расходы сточной воды по зонам следующие:

– анаэробной зоне

$$Q^{\text{ана}} = Q_{\text{вх}} + Q_{R1},$$

– аноксидной зоне

$$Q^{\text{ано}} = Q_{\text{вх}} + Q_{R1} + Q_{R2} + Q_{R3},$$

– аэробной зоне

$$Q^{\text{окс}} = Q_{\text{вх}} + Q_{R2} + Q_{R3}.$$

Для описания процессов в аэротенке использована модель Моно, описывающая рост биомассы ила на ограниченном количестве субстрата. Принципиальным элементом которой является зависимость удельной скорости роста ила от концентрации лимитирующего субстрата, где константа полунасыщения равна концентрации субстрата, при которой скорость роста ила равна половине максимальной.

Для примера приведена система дифференциальных уравнений, описывающая процессы в аэробной зоне аэротенка:

$$\frac{dL_{Sf}}{dt} = L_{Sf} + r_{Sf}(S_{O_2}, S_{NO}, X_S, X_b, L_{Sa}, L_{Sf}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, \bar{t}),$$

$$\frac{dL_{Sa}}{dt} = L_{Sa} + r_a(S_{O_2}, S_{NO}, X_S, X_b, L_{Sa}, L_{Sf}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, L_{ALK}, X_{pha}, \bar{t}),$$

$$L_{Si} = L_{Si},$$

$$\frac{dX_b}{dt} = X_b - r_{Xb}(S_{O_2}, S_{NO}, S_{NH_4}, X_S, X_b, L_{Sa}, L_{Sf}, S_{P-PO_4}, \bar{t}),$$

$$\frac{dX_S}{dt} = X_S + r_{X_S}(X_b, X_{abt}, L_{ALK}, X_{pao}, \bar{t}),$$

$$\frac{dX_i}{dt} = X_i + r_{X_i}(X_b, X_{abt}, L_{ALK}, X_{pao}, \bar{t}),$$

$$\frac{dX_{abt}}{dt} = X_{abt} + r_{X_{abt}}(X_{abt}, \bar{t}),$$

$$\frac{dS_{NH_4}}{dt} = S_{NH_4} + r_{S_{NH_4}}(S_{O_2}, S_{NO}, X_S, X_b, X_{abt}, L_{Sa}, L_{Sf}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, L_{ALK}, X_{pha}, X_{pao}, \bar{t}),$$

$$\frac{dS_{NO}}{dt} = S_{NO} + r_{S_{NO}}(S_{O_2}, S_{NO}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, L_{Sa}, L_{Sf}, \bar{t}),$$

$$\frac{dpH}{dt} = pH + r_{pH}(S_{O_2}, S_{NO}, X_S, X_b, X_{abt}, L_{Sa}, L_{Sf}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, \bar{t}),$$

$$\frac{dS_{P-PO_4}}{dt} = S_{P-PO_4} + r_{P-PO_4}(S_{O_2}, S_{NO}, S_{P-PO_4}, X_b, X_{abt}, L_{Sa}, L_{Sf}, S_{NH_4}, L_{ALK}, X_{pha}, X_{pao}, X_{pp}, \bar{t}),$$

$$\frac{dL_{ALK}}{dt} = L_{ALK} + r_{ALK}(S_{O_2}, S_{NO}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, X_S, X_b, X_{abt}, L_{Sa}, L_{Sf}, L_{ALK}, X_{pha}, X_{pao}, X_{pp}, \bar{t}),$$

$$\frac{dX_{pao}}{dt} = X_{pao} + r_{pao}(S_{O_2}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, L_{ALK}, X_{pha}, X_{pao}, X_{pp}, \bar{t}),$$

$$\frac{dX_{pp}}{dt} = X_{pp} + r_{pp}(S_{O_2}, S_{P-PO_4}, L_{ALK}, X_{pha}, X_{pao}, X_{pp}, \bar{t}),$$

$$\frac{dX_{pha}}{dt} = X_{pha} + r_{pha}(S_{O_2}, S_{NH_4}, S_{P-PO_4}, L_{ALK}, X_{pha}, X_{pao}, X_{pp}, \bar{t}).$$

Аналогичные уравнения составляются для всех зон аэротенка. Модель для UCT-процесса состоит из трех групп уравнений (для каждой зоны аэротенка), по 15 в каждой. Решение осуществляется совместно.

Приведенная система дифференциальных уравнений является задачей Коши и решается модифицированным методом Эйлера.

Предлагаемая математическая модель реализована в разработанном программном комплексе, интерфейс которого представлен на рис.2. В качестве примера приведены результаты численного эксперимента проведенного с помощью разработанного программного комплекса.

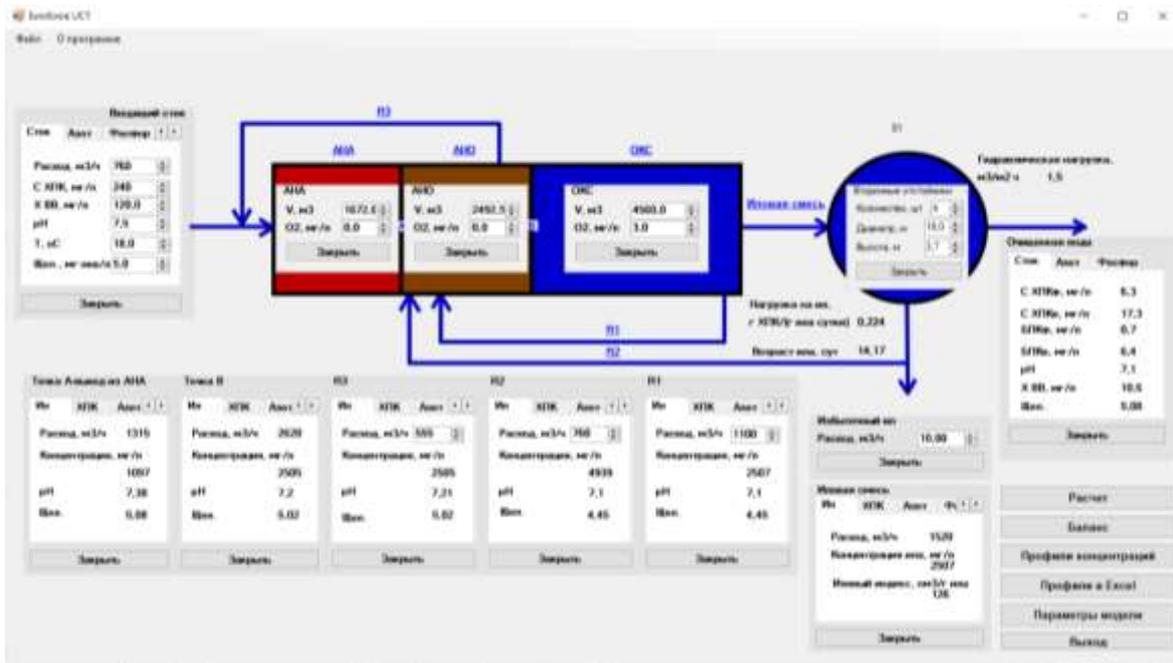


Рис.2. Интерфейс программного комплекса (расчетный расход 760 м³/ч)

В расчетах приняты следующие параметры стока на входе КОС:  $Q = 760 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{ВВ \text{ р}} = 120 \text{ мг/л}$ ;  $C_{ХПК \text{ р}} = 240 \text{ мг/л}$ ;  $T = 18^\circ\text{C}$ ;  $pH = 7,5$ ;  $\text{Щел.} = 5,0 \text{ мг-экв/л}$ ;  $S_{NH4} = 20 \text{ мг/л}$ ;  $S_{NO3} = 0,6 \text{ мг/л}$ ;  $S_{PO4} = 2,4 \text{ мг/л}$ , которые приведены на рис.3.

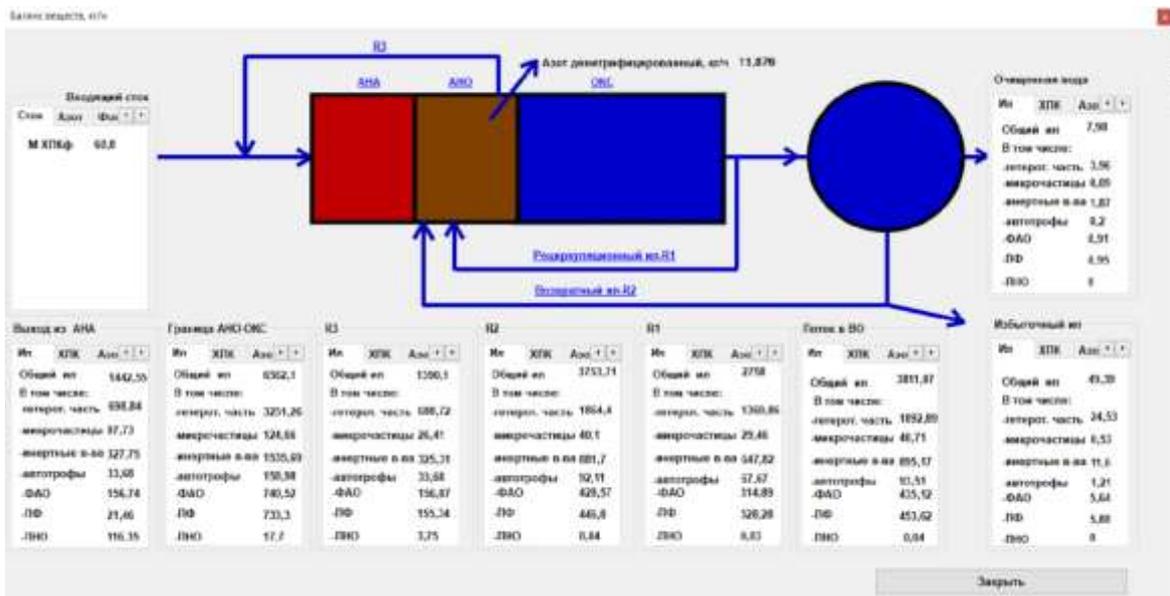


Рис. 3. Результаты расчета

В качестве примера приведены результаты численного эксперимента в трех режимах эксплуатации с учетом изменения расхода сточных вод, поступающих на КОС. Первый режим (расчетный расход –  $K_{\text{ч}} = 1$ )  $Q = 760 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{\text{ВВ р}} = 120 \text{ мг/л}$ ;  $C_{\text{хпк р}} = 240 \text{ мг/л}$ ;  $T = 18^\circ\text{C}$ ;  $pH = 7,5$ ; Щел.=  $5,0 \text{ мг-экв/л}$ ;  $S_{\text{NH}_4} = 20 \text{ мг/л}$ ;  $S_{\text{NO}_3} = 0,6 \text{ мг/л}$ ;  $S_{\text{PO}_4} = 2,4 \text{ мг/л}$ . Второй режим ( $K_{\text{ч}} = 0,66$ )  $Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{\text{ВВ р}} = 120 \text{ мг/л}$ ;  $C_{\text{хпк р}} = 240 \text{ мг/л}$ ;  $T = 18^\circ\text{C}$ ;  $pH = 7,5$ ; Щел.=  $5,0 \text{ мг-экв/л}$ ;  $S_{\text{NH}_4} = 20 \text{ мг/л}$ ;  $S_{\text{NO}_3} = 0,6 \text{ мг/л}$ ;  $S_{\text{PO}_4} = 2,4 \text{ мг/л}$ . Третий режим ( $K_{\text{ч}} = 1,32$ )  $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{\text{ВВ р}} = 120 \text{ мг/л}$ ;  $C_{\text{хпк р}} = 240 \text{ мг/л}$ ;  $T = 18^\circ\text{C}$ ;  $pH = 7,5$ ; Щел.=  $5,0 \text{ мг-экв/л}$ ;  $S_{\text{NH}_4} = 20 \text{ мг/л}$ ;  $S_{\text{NO}_3} = 0,6 \text{ мг/л}$ ;  $S_{\text{PO}_4} = 2,4 \text{ мг/л}$ . Результаты расчета изменения концентрации биогенных веществ при движении по аэротенку представлены на рис. 4–6.

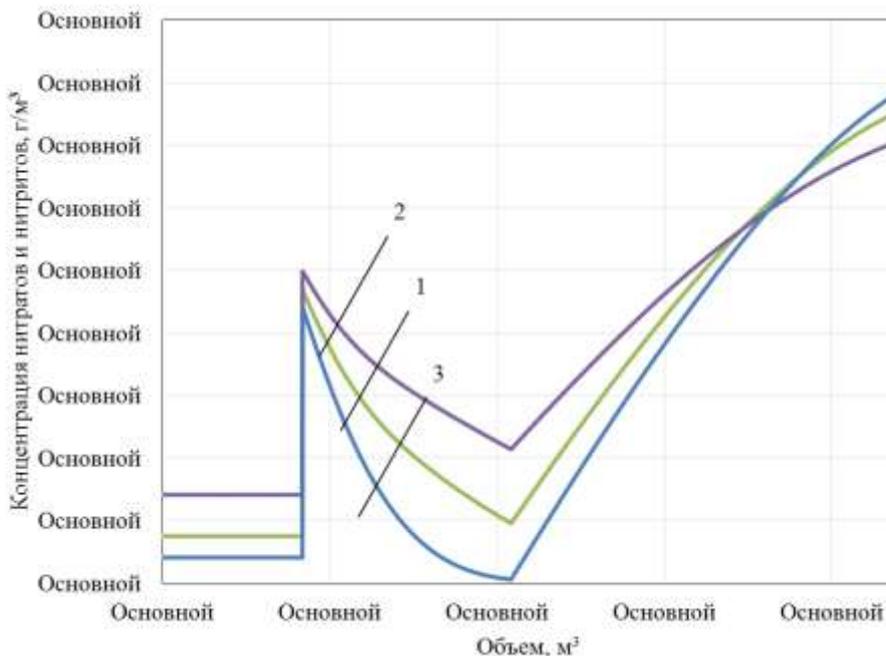


Рис. 4. Изменение концентрации нитратов и нитритов в аэротенке

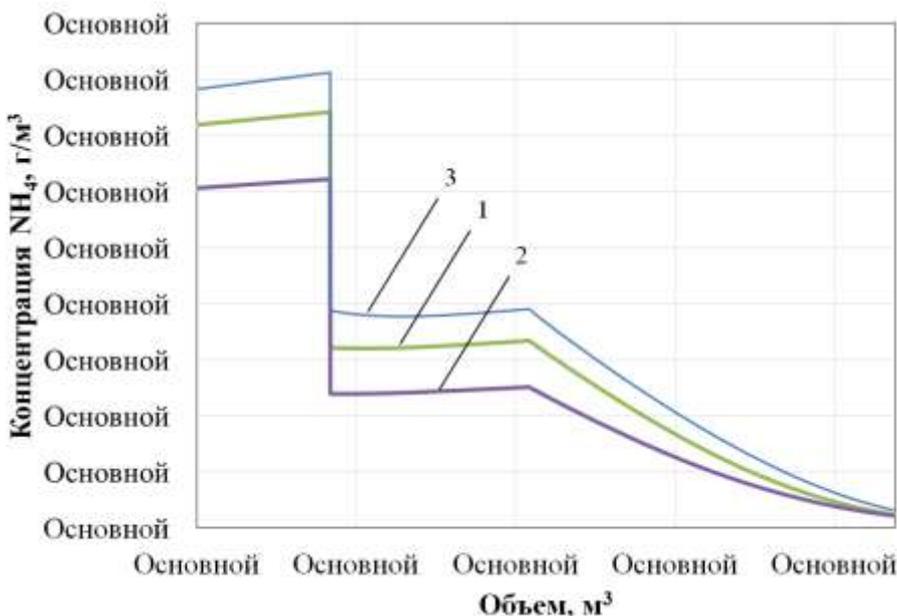


Рис. 5. Изменение концентрации соединений аммония в аэротенке

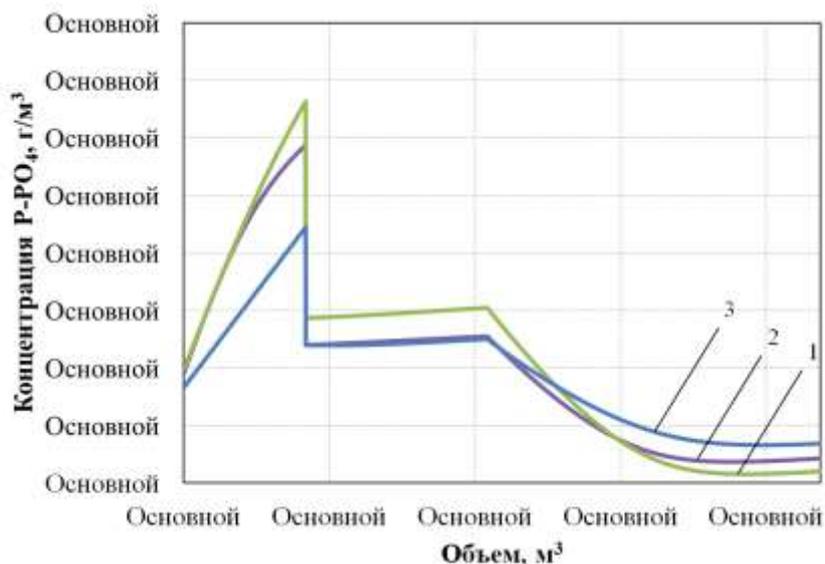


Рис. 6. Изменение концентрации фосфора фосфатов в аэротенке

Результаты численного эксперимента показывают, что изменение расходов, даже в пределах, установленных нормативной документацией часовой неравномерности, оказывает существенное влияние на качество сбрасываемых сточных вод в водный объект.

Внедрение на КОС эксплуатационных моделей совместно с современными технологиями обработки воды позволит обеспечить качественную очистку сточных вод в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Обосновано применение разработанной математической модели, позволяющей осуществлять поверочный расчет сооружений биологической очистки сточных вод, составлять алгоритмы управления процессами на КОС с учетом параметров на входе в блок биологической очистки.

2. На основе предлагаемой математической модели разработан программный комплекс, который позволяет определять параметры процессов, происходящих в блоке биологической очистки сточных вод.

#### Список используемых источников

1. О водоснабжении и водоотведении: федеральный закон РФ № 416-ФЗ от 07.12.2011. – URL: [consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_122867](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867) (дата обращения: 13.01.2021).

2. Об охране окружающей среды: федеральный закон РФ № 7-ФЗ от 10.01.2002 [в ред. от 01.01.2018]. – URL: [consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823) (дата обращения: 14.01.2021).

3. Водный кодекс Российской Федерации: федеральный закон РФ № 74-ФЗ от 03.06.2006 [ред. от 29.07.2017]. – URL: [consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_60683](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683) (дата обращения: 15.01.2021).

4. Об основах регулирования тарифов организаций коммунального комплекса: федеральный закон № 210-ФЗ от 30.12.2004. – URL: [consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51037](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51037) (дата обращения: 14.01.2021).

5. Анисимов Ю. П., Саркисов С. В. Основные положения программы модернизации водопроводно-канализационного хозяйства Министерства Обороны Российской Федерации // Сборник докладов круглого стола международного военно-технического форума «Армия

2018». – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. – С. 55–63.

6. Анисимов Ю. П., Попов Ю. А. Факторы, влияющие на эффективность биологической очистки сточных вод // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 10. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6617](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6617) (дата обращения: 13.01.2021).

7. Activated Sludge Model No. 1 / М. Henze [et al.] // Scientific and Technical Report. – 1987. – № 1.

8. Activated Sludge Model No. 2 / М. Henze [et al.] // Scientific and Technical Report. – 1995. – № 3.

9. Activated Sludge Model No. 3 / М. Henze [et al.] // Water Science and Technology. – 1999. – № 39(1).

В. А. Вакуненко\*,  
кандидат технических наук, доцент;

В. И. Мусатов\*;

А. В. Николаев\*\*,  
доктор технических наук, доцент;

С. В. Саркисов\*,  
доктор технических наук, доцент

\*Военная академия материально-технического обеспечения  
имени генерала армии А. В. Хрулева, г. Санкт-Петербург.

\*\*ФГБУ «Институт машиностроения имени А. А. Благодатова  
Российской академии наук», г. Москва.

## ОЦЕНКА РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ

Основной проблемой капельного орошения является засорение капельницы, что зачастую возникает при орошении почвы очищенными сточными водами. Авторами статьи была проанализирована работа четырех различных типов капельных оросителей на предмет частоты возникновения засоров и выявления зависимости между источником поступающей на орошение воды и вероятностью возникновения засора. Актуальность начатого исследования обусловлена возрастающей ролью, более выгодного в сравнении с традиционными источниками полива, капельного орошения в области сельского хозяйства.

Ключевые слова: капельное орошение, засор, сточные воды.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее эффективным средством для орошения сельскохозяйственных площадок в засушливых районах Российской Федерации является капельное орошение. Это экономически выгодный и экологичный способ орошения, позволяющий заниматься сельским хозяйством в районах, где ранее это было невозможно.

Система капельного орошения представляет собой комплекс различных технологических узлов, соединенных между собой трубопроводной сетью, в котором последним звеном является капельница. Из нее вода подается порционно в виде капель или струй на поверхность почвы. Данная особенность позволяет снизить затраты труда, сократить затрачиваемый объем воды и потери на сток, снизить патогенное воздействие и применять капельные системы в районах с засушливым климатом.

Многие исследования показали, что в результате применения систем капельного орошения объемы воды, затрачиваемые на полив, сокращаются на 30–70% [1]. При капельном орошении объем оросительной нормы может быть значительно меньшим в сравнении с традиционными способами полива. Это, в свою очередь, означает, что источником воды для орошения могут являться озера, пруды, грунтовые воды и другие водоемы.

### ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ КАПЕЛЬНОГО ОРОСИТЕЛЯ

Наиболее распространенной проблемой систем орошения является засорение капельницы, влияющее на их производительность. Засорение происходит из-за высокого уровня содержания взвешенных веществ, органики, азота и фосфора в подающихся очищенных сточных водах. В целом причины возникновения засоров можно разделить на три основные категории:

- 1) физические, вызванные повышенным содержанием взвешенных веществ;
- 2) химические, вызванные реакциями осаждения;

3) биологические, вызванные ростом и метаболизмом микроорганизмов, т. е. образованием биопленки.

Производители систем капельного орошения постоянно проводят работу по их совершенствованию. Так, с целью предотвращения засоров, обязательным компонентом капельных оросителей стала система фильтрации, служащая для сокращения концентрации взвешенных веществ перед распределением воды. Однако даже наличие подобных систем не способно в полной мере предотвратить засорение. Исследования, в ходе которых системы орошения были детально протестированы, показали, что частицы, слишком малые для улавливания фильтром, захватываются биопленкой, растущей на пути потока воды. Из этого следует, что накопление мелких частиц приводит к образованию агломераций клеток и твердых частиц и возможному засорению оросителей.

В камерах современных капельных оросителей образуется турбулентный поток воды, что уменьшает осаждение частиц и препятствует присоединению биопленки к внутренним стенкам. Также, этому способствует подача воды для промывки, которая периодически вводится в трубопроводную сеть для удаления биопленки и осевших частиц. Несмотря на данные меры, частота возникновения засоров в оросителях продолжает вызывать озабоченность. Засорение капельницы оросителя является основной причиной изменения расхода системы.

Для описания пространственной однородности системы капельного орошения может быть использован коэффициент однородности  $CU$ :

$$CU = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{ave}|}{\sum_{i=1}^n q_i}\right) \cdot 100,$$

где  $q_i$  – расход оросителя;  
 $q_{ave}$  – средний расход оросителя;  
 $|q_i - q_{ave}|$  – абсолютное отклонение от среднего.

При значении коэффициента более 70% работа оросителя считается удовлетворительной, при коэффициенте менее 70% – нет. Даже пара засоренных капельниц может значительно снизить равномерность подачи воды всей системы орошения, что не позволит ей функционировать в соответствии с заданной конструкцией.

Основным фактором, влияющим на скорость и степень возникновения засоров в капельницах оросителей, является качество исходной воды. Существует зависимость между типом оросителя, рН, содержанием взвешенных веществ и биохимической потребностью в кислороде (БПК<sub>5</sub>). Это свидетельствует о том, что увеличение степени очистки подаваемой воды может существенно повысить работоспособность системы орошения.

Наиболее эффективной степенью очистки подаваемых сточных вод обладают вторичные отстойники, позволяющие сократить показатели БПК<sub>5</sub> и содержания взвешенных веществ, преобразовать аммиак в нитраты, удалить азот через процессы денитрификации и нейтрализовать рН [2]. Данные сооружения, как правило, используются для очистки бытовых сточных вод, отходов пищевой переработки и промышленных отходов. Также эффективен будет процесс хлорирования, снижающий риск возникновения ила и биопленок [3].

Цель исследования состояла в определении взаимосвязи между качеством подаваемых сточных вод и производительностью системы капельного орошения. Для этого была подвергнута анализу работа четырех типов капельных оросителей, три из которых были предназначены для орошения очищенными сточными водами, а четвертый – водопроводной водой. Оросители были испытаны путем отслеживания их расхода на протяжении одного года.

Для проведения исследования была использована лабораторная установка капельного орошения с двенадцатью линиями капельных трубок. Источниками подаваемой на орошение воды являлись первичные отстойники, вторичные отстойники, а также водопроводная вода, используемая для проверок.

Характеристики изначальных сточных вод, поступающих на оросители в начале эксперимента, приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Характеристики стоков

Источник	Характеристики стоков			
	БПК <sub>5</sub> (мг/л)	Взвешенные вещества (мг/л)	Аммиак	pH
Первичный отстойник	147	55	18	6.5
Вторичный отстойник	0.5	3	1	7.2

В пару первичных отстойников было загружено 58 литров водопроводной воды, 500 мл первичного ила и 250 мл 0,363 М хлорида аммония, цикл их работы составил 24 часа. Третий (контрольный) отстойник отличается тем, что в него не были добавлены первичный ил и NH<sub>4</sub>Cl.

Через 24 часа работы сток от одного из первичных отстойников выгружали во вторичный отстойник для увеличения степени очистки. После прохождения через отстойник очищенные сточные воды попадали в дозирующий резервуар, который по размерам и конструкции был идентичен отстойнику.

Сточные воды из второго первичного отстойника и контрольного резервуара для водопроводной воды перемещались непосредственно в соответствующие дозирующие емкости без дальнейшей обработки. Каждый бак-дозатор содержал погружной насос, который подавал 0,06 л/с стока через прозрачную гибкую трубку в блок, содержащий управляемый соленоидом клапан, фильтрующий диск и регулятор давления. Каждый блок был соединен с ПВХ-коллектором, направляющим воду в четыре отдельные капельные трубки, по одной капельной трубке для каждого из четырех различных типов оросителей. Капельная оросительная трубка была соединена через переходники с другим идентичным коллектором, в котором оставшийся поток сточных вод собирали и возвращали в дозирующие резервуары. Скорость движения по трубопроводу капельной трубки составляла 0,46 м/с. Температуру воды для орошения поддерживали соответствующей комнатной температуре, которая колебалась между 23 и 25°C.

Были исследованы четыре различных типа труб капельного орошения и оросителей.

Тип 1: напорный мембранный ороситель для сточных вод, компенсирующий давление, расположенный, пропитанный биоцидом. Номинальный расход составляет 3,4 л/ч.

Тип 2: напорный ороситель для сточных вод. Номинальный расход составляет 2,0 л/ч.

Тип 3: безнапорная капельная трубка, используемая для транспортировки сточной воды к оросителю. Номинальный расход 3,9 л/ч.

Тип 4: безнапорная компенсирующая капельная трубка с оросителем для традиционного сельскохозяйственного орошения. Эта линия не предназначалась для распределения сточных вод. Номинальный расход составляет 4,0 л/ч.

График орошения поддерживался контроллером орошения. Данный контроллер управлял электромагнитными клапанами и насосами-дозаторами. Контроллер был запрограммирован на последовательное использование всех типов оросителей в течение 10 мин – 4 раза в день, семь дней в неделю. Для оценки эффективности оросителей, перед началом эксперимента для каждого из них в системе измеряли начальный расход. Скорость потока определяли путем измерения объема потока на выходе в течение фиксированной единицы времени. После запуска оросителей под каждый из них помещали пластиковую тару для сбора стоков в течение 120 с. Эту процедуру повторяли каждый месяц в течение всего эксперимента. Данные расхода оросителя анализировали с использованием статистической программы анализа

Microsoft Excel. Переменными служили изменения скорости потока с течением времени по сравнению с качеством сточных вод.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

### *Оросители 1-го типа*

После одного года непрерывного орошения контрольные оросители, распределяющие водопроводную воду, не показали признаков засорения.

Скорости потока оросителей, распределяющих очищенные сточные воды из первичных отстойников, в целом были снижены на 16%, при этом наиболее сильное снижение составило 63%.

Скорости потока оросителей, распределяющих воду от вторичного отстойника с песчаной загрузкой, были снижены в среднем на 3%.

### *Оросители 2-го типа*

Оросители, распределяющие водопроводную воду, не показали общих признаков засорения, однако один из них показал уменьшение объема потока на 7%.

Оросители, распределяющие сточные воды вторичных отстойников, не показали существенного засорения, за исключением одного оросителя.

Все оросители, распределяющие сточные воды из первичного отстойника, показали пониженные скорости потока со средним снижением на 12%.

### *Оросители 3-го типа*

Оросители 3-го типа, распределяющие водопроводную воду и сточные воды от вторичных отстойников с песчаной загрузкой, в целом не показали признаков засорения.

Скорости потока оросителей, распределяющих сточные воды из первичного отстойника, были снижены в среднем на 6%. Стандартное отклонение среднего снижения расхода для оросителей, распределяющих сточные воды из первичных отстойников, почти вдвое превышает два других типа оросителя в этой группе.

### *Оросители 4-го типа*

Оросители 4-го типа показали незначительные признаки засора после одного года непрерывной работы, за исключением одного оросителя, распределяющего сточные воды первичного отстойника. Среднее изменение расхода для этих оросителей было незначительным независимо от качества сточных вод. Как и в случае с другими тремя группами, снижение расхода было самым высоким для тех оросителей, которые распределяют сточные воды из первичного отстойника.

В целом постепенное снижение скорости потока с последующим частичным восстановлением скорости наблюдалось в оросителях каждого типа. Максимальное снижение расхода происходило через восемь-десять месяцев для оросителей первого типа, распределяющих сточные воды из первичного отстойника. Для оросителей 2-го, 3-го и 4-го типов, распределяющих сточные воды первичного отстойника, максимальное снижение расхода происходило в период от шести до десяти месяцев. В большинстве случаев временно наблюдалось частичное или полное восстановление скорости потока оросителя. Вполне вероятно, что рост биопленки внутри оросителя ограничивал проход, захватывая частицы, которые в противном случае проходили бы через оросителя, и приводил к наблюдаемому уменьшению потока [4]. В начале каждого цикла орошения при включении оросительных насосов возрастали скорость и давление, что, возможно, вызывало выброс биомассы и захваченного мусора, вследствие чего скорость потока оросителей частично восстанавливалась.

В конце отчетного периода проведения эксперимента отдельные оросители показали серьезное снижение производительности (до 63%). Оросители, предназначенные для использования сточных вод, показали меньшую степень засора после одного года непрерывной работы. Наилучшим источником воды для всех типов оросителей являлась сточная вода, поступившая от вторичных отстойников. Вода, поступившая от первичных отстойников без последу-

ющей обработки, не вызвала значительной степени засора для оросителей, используемых со сточными водами, однако явилась проблемой для оросителей, используемых в сельском хозяйстве. Анализ взаимосвязи между типом оросителя и изменением производительности (объема потока) показал, что тип оросителя является важной переменной, однако наиболее важной составляющей является степень очистки сточных вод, поступающих на ороситель. Авторами статьи сделан вывод о том, что использование сточных вод после вторичных отстойников способно значительно уменьшить степень засорения оросителей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была проанализирована работа четырех типов оросителей, с целью выявления зависимости между типом оросителя, качеством подаваемой на орошение воды и его производительностью.

В результате было определено, что наиболее важным фактором, влияющим на производительность капельного оросителя, является не его тип, а степень очистки подаваемой на него воды. Кроме того, наиболее предпочтительным источником воды, подаваемой на систему капельного орошения, является вторичный отстойник.

## Список используемых источников

1. NETAFIM: Irrigation equipment and drip systems // Product guide. – Israel, 2000. – 53 p.
2. *Медведева Л. В., Макаrchук Г. В., Мусатов В. И.* К вопросу снижения аварийности станций очистки сточных вод населенных пунктов // Проблемы управления рисками в техносфере: научно-аналитический журнал. – 2019. – № 3(51). – С. 69–75.
3. *Медведева Л. В., Макаrchук Г. В., Мусатов В. И.* Организация системы очистки бытовых сточных вод базы обеспечения учебного процесса военного городка // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2019. – № 3(31). – С. 48–54.
4. *Блинов А. В., Вакуненко В. А., Мусатов В. И.* Проектирование станций очистки сточных вод на объектах Министерства обороны Российской Федерации, расположенных в Санкт-Петербургском гарнизоне // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019 – Вып. 669. – С. 133–139.

Е. П. Вишняков,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
А. В. Ильин,  
*кандидат технических наук;*  
В. В. Рыбаков,  
*кандидат технических наук*

## **ВОПРОС ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Наличие большого количества электрооборудования, выработавшего свой ресурс, ограничений на финансирование масштабного ремонта основных фондов, разработка и внедрение эффективной системы управления ремонтной деятельностью являются основными задачами повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры. Эффективность применения электрооборудования напрямую зависит от качества технического обслуживания и ремонта.

Для решения этих задач широко используются методики определения остаточного ресурса электрооборудования, позволяющие с той или иной точностью прогнозировать момент наступления его предельного состояния.

Ключевые слова: эксплуатация, система электроснабжения, автоматизация технического обслуживания и ремонта, стратегии технического обслуживания и ремонта.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Промышленный интернет вещей, что означает Industrial Internet of Things (IIoT), активно применяется в разных отраслях промышленности. Технология позволяет успешно формировать базы данных и пересылать их автоматически без выполнения действий вручную. Эффективность работы технологии определяется возможностью удаленно контролировать и управлять эксплуатационными процессами объектов [1].

Основой технологии промышленного интернета вещей является совокупность компьютерной сети и датчиков, которые устанавливаются на объектах и устройствах (оборудовании) для сбора данных. Internet of Things (IoT)-технологии реализуются в системах телеметрии и телеуправлении и используются в отрасли для построения «умных» сетей и инфраструктуры Smart Grids [2]. Применение таких технологий позволяет контролировать состояние сетей в режиме онлайн, сохранять данные, определять степень риска дальнейшей эксплуатации объекта и при необходимости экстренного вмешательства обслуживающего персонала.

В российской энергетике IoT-технологии в основном применяются для снижения энергопотребления, контроля технического состояния оборудования и для предотвращения аварийных ситуаций. Широкое применение IoT-технологии наблюдается в системах анализа энергопотребления на предприятиях, которые позволяют выявить отклонения в потреблении электроэнергии типового оборудования, а также дают возможность обнаружить повреждение оборудования по характеру потребления.

Глобальная цифровизация объектов электроэнергетики диктует требования к внедрению цифровых технологий, а именно к технологии промышленного интернета и реализации ее на основных этапах жизненного цикла объекта.

Применение IoT-технологии на этапах проектирования и строительно-монтажных работ позволяет снизить трудоемкость перепроектирования в случае внесения изменений и дополнений в проект, создавать типовые проектные решения при разной конфигурации системы электроснабжения и протяженности распределительных сетей. Следует учесть, что кабель-

ные сети вторичных цепей могут использоваться с целью передачи информации для базы данных IoT, в результате чего существенно снижается стоимость кабельной системы.

Основным достоинством применения IoT-технологии при эксплуатации объектов является использование универсальной системы диагностики, которая позволяет в более короткие сроки устанавливать место и причину отказов, а также выявлять предотказные состояния.

Эксплуатация объекта с применением IoT-технологии позволяет перейти к использованию метода прогнозного обслуживания оборудования за счет абсолютного контроля эксплуатационных процессов, что обеспечивает сокращение затрат на эксплуатацию.

Модернизация системы автоматизации на базе IoT-технологии требует меньших расходов из-за возможности установки неограниченного количества приемников информации, чем при традиционных подходах [3].

Использование данной технологии дает возможность выявлять и прогнозировать возникновения разных рисков, учитывая все особенности производственного процесса и общего состояния объекта. Для этого система проводит непрерывный контроль всех важных показателей, которые напрямую определяют выполнение основных этапов и процессов [2].

Одно из приоритетных направлений совершенствования эксплуатации оборудования – это выявление дефектов оборудования в максимально короткие сроки для эффективного устранения.

IIoT-платформа является информационной системой, созданной для повышения эффективности эксплуатации оборудования. Рассмотрим пути совершенствования эксплуатации электрооборудования на базе технологий IIoT.

## **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Эксплуатация систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры связана с рисками аварий, пожаров и электротравматизма, приводящих к гибели и травматизму людей. Состояние основных фондов электрической отрасли, износ которых составил более 70%, негативное воздействие внешней среды и отсутствие эффективной системы диагностики электроустановок – объективные условия, которые в ближайшие годы могут привести к массовому выходу из строя основного оборудования объектов [4].

Цель эксплуатации – обеспечение эффективной работы электрифицированной производственной системы (ПС) за счет поддержания требуемой надежности и рационального использования электрооборудования. Одним из важнейших этапов эксплуатации является техническое обслуживание и ремонт.

Система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) существует на каждом предприятии, эксплуатирующем технологическое оборудование, машины, здания и сооружения. Стратегии ТОиР рассмотрены в [5, 6].

В настоящее время на объектах военной инфраструктуры применяется классическая система планово-предупредительного ремонта (ППР). Она проводится в строгом соответствии с заранее разработанным планом, учитывающим:

- принцип организации;
- периодичность проведения;
- объем и время выполнения;
- необходимое количество личного состава и рациональное его использование;
- форму контроля качества и сроков выполнения;
- материально-техническое обеспечение и др.

Основным недостатком данной системы является то, что время простоя оборудования в процессе выполнения профилактических работ является достаточно большим, что в результате снижает эффективность использования оборудования.

Также необходимо отметить систему ТОиР «по отказу», сущность которой заключается в том, что профилактические мероприятия на оборудовании выполняются только тогда, когда в нем возникает повреждение или отказ. Достоинством системы технического обслуживания, разработанной на основе аварийно-восстановительного принципа (ТОиР «по отказу»), является отсутствие дополнительных простоев оборудования на плановом обслуживании. Недостатки таких систем всем известны, поэтому необходимо ориентироваться на организацию ТОиР, которое направлено не только на устранение отказов, но и повышение эффективности эксплуатации в целом (рис. 1) [7, 8].

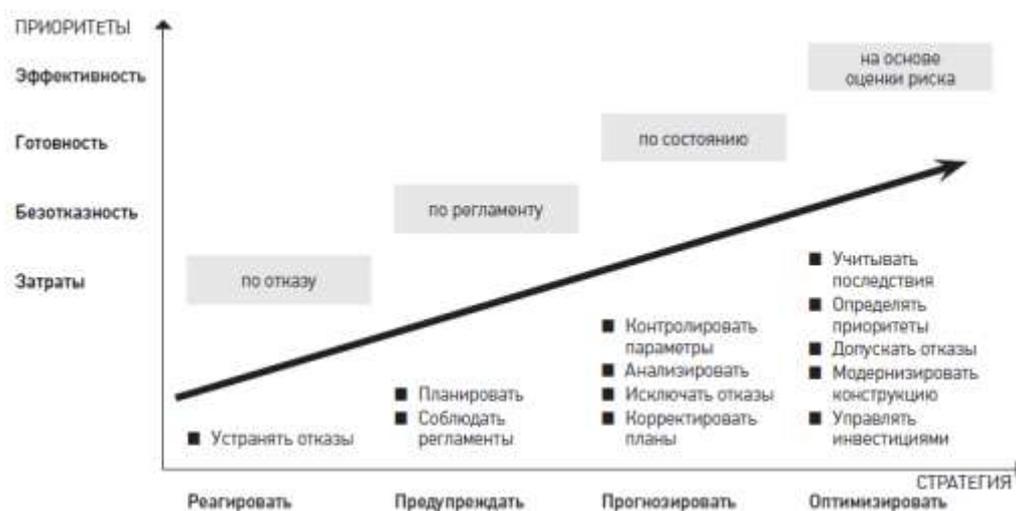


Рис. 1. Эволюция системы ТОиР

Для определения пути повышения эффективности эксплуатации электрооборудования необходимо рассмотреть основные положения, которые позволят понять проблемы применяемой системы ТОиР [9]. Рассмотрим их подробнее.

### 1. Затраты на ТОиР.

Данные о затратах на ТОиР хранятся без их привязки к единицам оборудования, на котором эти затраты возникли. В этом случае невозможно провести анализ стоимости жизненного цикла конкретного оборудования, принять обоснованное инвестиционное решение о замене или восстановлении ресурса той или иной единицы оборудования, основываясь на оценке альтернатив: продолжить эксплуатацию, списать и купить новое оборудование, провести модернизацию.

### 2. Регистрация дефектов.

Данные зарегистрированных дефектов, как медицинская карта, свидетельствуют о «болезнях» оборудования, если дефекты регистрируются с привязкой к оборудованию, на котором они обнаружены. Если этого нет, то определить, какое оборудование «больное» не возможно. Может быть так, что в группе из нескольких идентичных объектов есть одна единица оборудования, которая «генерирует» множество дефектов по различным причинам (производственный брак, условия эксплуатации, недостатки обслуживания).

### 3. Критичность отказа.

Мерой количественной оценки является тяжесть последствий отказа. Отказы характеризуются разной тяжестью последствий и разной критичностью. Критичным является оборудование, отказы которого имеют высокую тяжесть последствий. Прежде всего, чтобы разработать адекватную программу ТОиР, включая выбор политики управления отказами, необходимо, например, выбрать обслуживание по техническому состоянию для критичного оборудования.

Кроме того, критичность оборудования нужно знать для того, чтобы:

- рационально определить запас запчастей для оборудования с разной критичностью;
- обоснованно планировать инвестиции: оборудование с высокой критичностью должно иметь приоритет в программах модернизации или замены;
- сосредоточить усилия инженеров по надежности на наиболее важных активах;
- сократить объем трудоемких процедур, таких как анализ видов, последствий и критичности отказов.

#### **4. Ранжирование оборудования по величине риска отказа.**

Мерой риска отказа в соответствии с [10] является произведение вероятности отказа на тяжесть его последствий. Отказ может быть критичным, но если его вероятность очень мала, то риск не значителен. И наоборот, если отказ имеет умеренную тяжесть последствий (например, в объеме стоимости недовыработка электроэнергии), но большую вероятность, то риск отказа значителен. Риски отказа должны оцениваться количественно. Если этого не делать, то невозможно определить оборудование с большим, средним и низким риском отказа и приоритетность работ по ТОиР, техническому перевооружению и реконструкции (ТПиР).

Упорядоченный по убыванию риска список оборудования позволяет направить ограниченные ресурсы на выполнение работ именно на том оборудовании, которое находится в верхней части списка. Благодаря этому, ограниченные ресурсы расходуются оптимально и достигается наибольший эффект в повышении надежности и снижении риска отказов.

#### **5. Избыточность или недостаточность программы ТОиР.**

Каждый производитель оборудования стремится к тому, чтобы его оборудование имело репутацию наиболее надежного. Поэтому рекомендуемые ими программы предупредительного обслуживания основаны на предположении наихудшего случая. Часто это приводит к избыточной программе обслуживания. Тот факт, что производитель обычно продает и запасные части, необходимые для выполнения рекомендованного профилактического обслуживания, также приводит к потенциальному конфликту интересов с эксплуатирующей организацией.

Чтобы проанализировать программу ТОиР на предмет избыточности или недостаточности, нужно сформировать полную базу данных по эксплуатируемому оборудованию, сформировать список выполняемых плановых предупредительных работ, привязать эти работы к оборудованию. Также необходимо собрать статистику по зарегистрированным дефектам и отказам с привязкой к оборудованию с указанием причин отказов. Все эти данные обычно накапливаются в информационной системе управления ТОиР [10].

#### **6. Оплата ремонта по принципу «от объема выполненных работ».**

При таком подходе – чем больше ремонтов, тем больше прибыль подрядчика. Следовательно, подрядчик не заинтересован в надежности функционирования оборудования и, в конечном счете, не заинтересован в повышении качества ремонтов используемых запчастей, квалификации своих специалистов.

Современный подход состоит в том, что стоимость сервисных услуг определяется не объемом выполненного ТОиР, а достигнутым коэффициентом технической готовности (Кг) оборудования. Целевое значение Кг устанавливается в договоре на сервисные услуги. Если по факту Кг оказался ниже, то сервисная организация платит штраф или снижает стоимость своих услуг на следующий период на соответствующую сумму.

#### **7. Обеспечение ЗИП.**

Может быть так, что работы из плана исключены, а запчасти, которые планировались под эти работы, остались в плане закупок и были в итоге закуплены. Причина – отсутствие неразрывной информационной связи «работа-запчасть», из-за чего работа выпадает, а запчасть остается. Это происходит при планировании «на бумаге», когда планируется большое количество работ. В данном случае склад наполняется невостребованными запчастями. Избежать этого можно, используя информационную систему управления ТОиР, в которой как раз и со-

здается связь между каждой позицией в плане закупок запчастей и соответствующей работой [9].

Учитывая перечисленные выше положения, можно сделать вывод, что если хотя бы часть положений имеет место в существующей системе ТОиР, то для повышения эффективности эксплуатации необходимо провести ряд мероприятий по совершенствованию существующей системы ТОиР. Для ее совершенствования необходимо выполнить ряд этапов.

На рис. 2. представлена модель повышения эффективности эксплуатации электрооборудования.

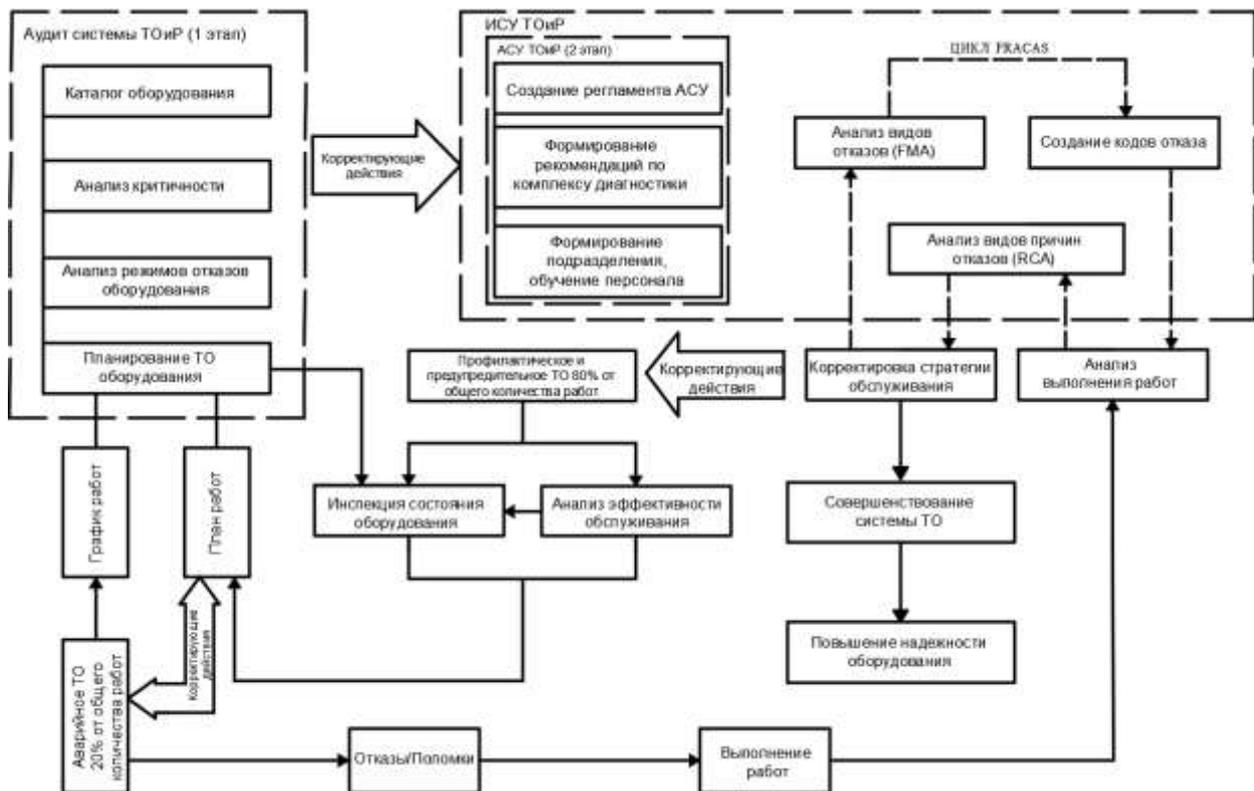


Рис. 2. Модель повышения эффективности эксплуатации электрооборудования

На рисунке: Модель повышения эффективности эксплуатации электрооборудования

На **первом этапе** необходимо провести аудит системы ТОиР и по его результатам разработать программу улучшений.

В процессе аудита системы ТОиР проводится ряд работ.

1. Анализ критичности электрооборудования, целью которого является идентификация оборудования, отказ которого будет иметь наиболее серьезные последствия для объекта. К таким последствиям относятся:

- снижение производственной мощности и (или) загрузки оборудования;
- высокая стоимость потерь, включающая стоимость восстановительных работ;
- экологические последствия;
- вопросы безопасности.

2. Анализ режимов отказов оборудования.

Цель большинства стратегий технического обслуживания заключается в прогнозировании и предупреждении отказов оборудования. Основной задачей технического обслуживания является устранение причин и предотвращение отказов оборудования. В свою очередь, главной задачей технического обслуживания по состоянию является обнаружение дефектов оборудования и управление потенциальными отказами прежде, чем они вызовут его функциональный отказ.

На объектах военной инфраструктуры используются программы, основанные на стратегии профилактического (предупредительного) технического обслуживания и, как правило, не учитывается специфика разных видов отказов.

3. Анализ потенциала трансформации системы ремонтов, исходя из сравнения показателей (надежности, доступности оборудования, простоев и др.) с лучшими практиками и этапами эволюции сервиса.

**Вторым этапом** является разработка основы новой системы ТОиР (процессы, процедуры, методики), а также разработка технического задания на информационную систему ТОиР и внедрение этой системы на основе специального программного обеспечения класса *Enterprise Asset Management System* (EAM). На данном этапе осуществляется ряд работ.

1. Создание регламента автоматизированной системы управления техническим обслуживанием (АСУ ТОиР) с учетом выполнения следующих условий:

- организация эксплуатации АСУ ТОиР таким образом, чтобы были выполнены требования по достаточности и достоверности данных для управления процессом ТОиР;
- формирование перечня ключевых показателей деятельности, которые будут использоваться для успешного выполнения задач ТОиР при определении размера стоимости услуг и штрафных санкций;
- формирование состава справочников эксплуатационных состояний, классификация дефектов, контролируемые параметры оборудования и т. д.

2. Формирование рекомендаций по комплексу диагностики. На данном этапе проводится ранжирование оборудования по критичности отказов и принимается решение об установке диагностирующих устройств.

3. Формирование подразделения или определение лиц, которые будут заниматься управлением рисками, связанными с эксплуатацией и обслуживанием электрооборудования. Подборка экспертов по видам оборудования. Обучение персонала, с целью повышения его компетентности в области современных практик управления активами в соответствии с международными стандартами ISO 55000.

На этапе эксплуатации отличным инструментом, который можно использовать для предотвращения и устранения отказов, является система отчетности об отказах, анализе отказов и корректирующих действиях (Failure Reporting, Analysis, and Corrective Action System FRACAS).

**Третий этап** – это внедрение модели проактивного технического обслуживания как основа для устранения отказов оборудования. Встроенные в модель (рис. 2) процессы непрерывного улучшения планов выполнения работ, анализ отказов и их причин, а также система корректирующих действий (FRACAS) помогут обеспечить надежность и ремонтпригодность оборудования, а также дать возможность улучшения этих показателей [11, 12].

Модель FRACAS позволяет проводить анализ выполненных работ, чтобы решить, какую методику необходимо применить в каждом конкретном случае [13]:

- RCA-анализ коренных причин отказов;
- RCM-анализ возможных отказов систем, их элементов и последствий отказов;
- FMEA анализа видов и последствий отказов.

Мониторинг оборудования, выполняемый после того, как произведена корректировка стратегии обслуживания, может выявить новые отказы, которые не охвачены этой стратегией. В этом случае необходимо создать новые коды для выявленных видов отказов, внести их в систему управления активами предприятия (EAM) и далее отслеживать их при выполнении анализа выполненных работ. Таким образом можно сделать вывод, что это непрерывный цикл совершенствования, который никогда не заканчивается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение технологий промышленного интернета вещей IoT дает преимущества на всех этапах реализации и эксплуатации объекта. Такие технологии дают возможность выявлять и прогнозировать возникновение разных рисков, учитывая все особенности производственного процесса и общего состояния объекта, что позволяет совершенствовать и повышать эффективность эксплуатации электрооборудования и системы электроснабжения в целом.

Одним из путей повышения эффективности эксплуатации электрооборудования с применением технологий IIoT является совершенствование системы управления ТОиР и внедрение АСУ ТОиР.

Предложенная авторами модель повышения эффективности эксплуатации электрооборудования позволяет решить ряд задач по аудиту применяемой системы ТОиР, внедрению автоматизированной системы ТОиР, постоянной корректировке стратегии технического обслуживания, направленного на повышение надежности оборудования и системы электроснабжения в целом.

### Список используемых источников

1. Промышленный интернет вещей и Индустрия 4.0 // INTELVISION. – URL: <https://www.intelvision.ru/blog/iiot> (дата обращения: 12.01.2021).
2. *Мачей Кранц*. Интернет вещей. Новая технологическая революция / пер. с англ. З. Мамедьярова. – М.: Бомбора™, 2018. – 332 с.
3. *Сидоров А.В.* Оценка эффективности ремонтного обслуживания производства // Консалтинговый проект «ЕАМ». – URL: <http://eam.su/ocenka-effektivnosti-remontnogo-obsluzhivaniya-proizvodstva.html> (дата обращения: 12.01.2021).
4. *Вишняков Е. П., Ильин А. В., Швайковский М. А.* К вопросу автоматизации систем управления техническим обслуживанием и ремонтом // Сборник III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – С. 467–471.
5. *Овсянников А. Г.* Стратегии ТОиР и диагностика оборудования // *Новости электротехники*. – 2008. – № 2(50). – С. 140–142.
6. *Антоненко И. Н., Волосевич Л. П.* Автоматизированная система управления техническим обслуживанием и ремонтами – инструмент оптимизации издержек // *Энергетика*. – 2005. – № 7. – С. 24–26.
7. *Антоненко И. Н., Крюков И. Э.* Информационные системы и практики ТОиР: этапы развития // *Главный энергетик*. – 2011. – № 10. – С. 37–44.
8. Почему ваша система ТОиР нуждается в улучшении // *Экономика и Жизнь*. – URL: <https://www.eg-online.ru/article/424720/> (дата обращения: 28.08.2020).
9. ГОСТ 51897–2011. Менеджмент риска. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 12 с.
10. *Естафьев Е. Н.* Организация сбора данных для выбора оптимальной стратегии управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования // *Металлург*. – 2009. – № 3. – С. 30–33.
11. *Моубрэй Джон*. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность / пер. с англ. К. А. Зырянова и В. С. Смирнова; под общ. ред. К. А. Зырянова. – Екатеринбург: Зырянов К. А., 2018. – 443 с.
12. RCA. Поиск и анализ коренных причин отказов оборудования // TOIP PRO. – URL: <https://toir.pro/mod/book/view.php?id=470&chapterid=326> (дата обращения: 23.12.2020).
13. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 2018. – 23 с.

14. ГОСТ 27.3.01–2005. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований к надежности. – М.: Издательство стандартов, 2006. – 30 с.

15. ГОСТ Р 27.606–2013. Надежность в технике Управление надежностью Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. – М.: Издательство стандартов, 2014. – 34 с.

16. ГОСТ 18322–2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения – М.: Стандартиформ, 2017. – 14 с.

17. «Интернет вещей» в электроэнергетике. Применение и перспективы. – URL: <https://www.elec.ru/articles/internet-veshej-v-elektroenergetike-primenenie-i-p/> (дата обращения: 10.01.2021).

18. *Хорольский В. Я., Таранов М. А.* Надежность электроснабжения: учеб. пособие. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2013. – 128 с.

А. Е. Воронин,

*кандидат технических наук;*

Н. Е. Пешехонов,

*кандидат технических наук, доцент;*

В. В. Рыбаков,

*кандидат технических наук*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ КОЛЬЦЕВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО МИНИМУМУ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Рассмотрены основные направления экономии электроэнергии в распределительных сетях систем электроснабжения рассредоточенных объектов. Определены оптимальные по экономии электроэнергии режимы работы сетей. Представлены пути увеличения их энергоэффективности. Показана возможность применения генетических алгоритмов для определения оптимальных точек разрыва.

Ключевые слова: потери электроэнергии, кольцевые линии, баланс мощностей, точка разрыва, генетические алгоритмы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При протекании электрического тока по линиям вследствие физических процессов в проводниках возникают потери электрической энергии. При этом от потерь невозможно избавиться, их можно только уменьшить различными способами.

Как известно, потери электроэнергии – это значительная составляющая затрат на эксплуатацию систем электроснабжения (СЭС), поэтому одной из задач проектировщиков и эксплуатационного персонала является снижение этих потерь. Уровень потерь характеризует организацию эксплуатации, состояние организации учета электроэнергии и правильность выбора точек учета.

Принято считать, что общие потери мощности при ее передаче и распределении удовлетворительны в том случае, если не превышают четырех процентов. Потери мощности на уровне десяти процентов – максимально допустимые [2].

Мероприятия по снижению электрических потерь можно разделить на две группы:

– требующие дополнительных вложений, как правило, это замена элементов СЭС (или введение новых), их называют техническими;

– не требующие дополнительных затрат (либо несущественных затрат), как правило, их называют организационными.

Достаточно часто в результате длительной эксплуатации систем электроснабжения изменяются как условия эксплуатации, так и технические характеристики элементов СЭС, что приводит к снижению качества их функционирования, увеличению потерь электроэнергии. Данные проблемы могут быть решены проведением модернизации СЭС с изменением структуры электросетей, заменой элементов и узлов оборудования на современные.

### **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Очевидно, что функционирование систем электроснабжения имеет свою специфику, поэтому при акцентировании усилий на энергосбережение необходимо это учитывать. В этой связи рассмотрим более детально снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях 10 (6) кВ.

Снижение потерь электроэнергии при ее передаче и распределении является актуальной задачей организаций и одним из основных направлений энергосбережения [1]. Главным условием работы электрической сети с минимальными потерями является ее рациональное построение. При этом особое внимание должно быть уделено правильному определению точек деления в замкнутых сетях, экономичному распределению активных и реактивных мощностей, внедрению замкнутых и полузамкнутых схем сетей.

Потери энергии в рационально построенных и нормально эксплуатируемых сетях не должны превышать обоснованного технологического расхода энергии при ее передаче и распределении. Мероприятия по снижению потерь энергии должны проводиться в сетях, где есть те или иные отклонения от рационального построения и оптимального режима эксплуатации.

В нормативно-правовых документах определены аргументированные пределы потерь электроэнергии. Снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях может быть достигнуто как в результате проведения мероприятий по общей оптимизации сети, когда снижение потерь энергии является одной из составляющих частей комплексного плана, так и в результате проведения мероприятий, направленных только на снижение потерь.

К организационным мероприятиям могут относиться мероприятия различного рода [1], например:

- определение (выбор) точек оптимального деления сети 10 (6) кВ;
- уменьшение времени нахождения линии в отключенном состоянии при выполнении технического обслуживания и ремонта оборудования и линий;
- снижение несимметрии (неравномерности) загрузки фаз;
- рациональная загрузка силовых трансформаторов.

В данной статье такие элементы СЭС как силовые трансформаторы не рассматриваются, остановимся только на определении точек оптимального деления сети (точек разрыва).

По принятым принципам построения распределительных сетей 10 (6) кВ, они, как правило, эксплуатируются по разомкнутым схемам с возможностью взаиморезервирования. Это обусловлено, в первую очередь, сложностью настройки релейных защит и необходимостью введения в них дополнительных элементов. При расчете и проектировании электрических сетей на первом этапе выполняются требования по уровню напряжения у потребителей. В то же время необходимо обеспечить наиболее экономичный режим работы сетей. В этом случае изменения точек разрыва сети влияют только на одну составляющую эксплуатационных расходов – потери электроэнергии. Поэтому основной целью оптимизации режима эксплуатации сетей является выбор таких точек разрыва (места размыкания сети), которые обеспечат требуемую надежность электроснабжения и минимальные потери электроэнергии в электрических сетях без дополнительных затрат. Их положение будет определять структуру электрических сетей и максимально экономичный режим. При эксплуатации сетей на положение мест размыкания влияет много факторов, в том числе опыт и интуиция обслуживающего персонала, необходимость и возможность быстрого восстановления электроснабжения при аварии.

Известно, что большая часть потерь активной мощности концентрируется в сетях 0,4–10 кВ. Потери активной мощности в линиях электропередачи (ЛЭП) определяются по формуле [2, 3]

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 \cdot I_{\text{л}}^2 \cdot R_{\text{л}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{л}}$  – электрический ток линии;  
 $R_{\text{л}}$  – сопротивление линии.

При этом следует учесть, что  $I_{\text{л}}$  и  $R_{\text{л}}$  можно определить с использованием выражений:

$$I_{\text{л}} = P_{\text{л}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{л.ном}} \cdot \cos \varphi), \quad (2)$$

где  $P_{л}$  – активная мощность в линии, кВт;  
 $U_{л.ном}$  – номинальное напряжение в линии, кВ;  
 $\cos \varphi$  – коэффициент мощности;

$$R_{л} = \rho \cdot l_{л} / F_{л}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление токопроводящего материала, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  
 $l_{л}$  – длина линии, м;  
 $F_{л}$  – сечение линии, мм<sup>2</sup>.

С учетом вышеизложенного, потери мощности в линиях будут определяться по формуле

$$\Delta P_{л} = \frac{\rho \cdot l_{л} \cdot P_{л}^2}{U_{л.ном}^2 \cdot F_{л} \cdot \cos^2 \varphi}. \quad (4)$$

Как известно, из-за сложностей построения релейной защиты кольцевую схему принято «разрывать» в одном месте. От места разрыва кольцевой схемы зависят потери в линиях. При сравнительно небольшом количестве возможных точек разрыва используют метод прямого перебора, при этом использование сравнительно простых программ в среде Excel значительно облегчает этот процесс.

В сложных сетях (рис. 1), когда количество разрывов должно быть несколько, этот метод не всегда работает, так как требует большого количества вычислений или применения специальных методов. При этом необходимо также учитывать ограничения по пропускной способности линий и по допустимой потере напряжения.

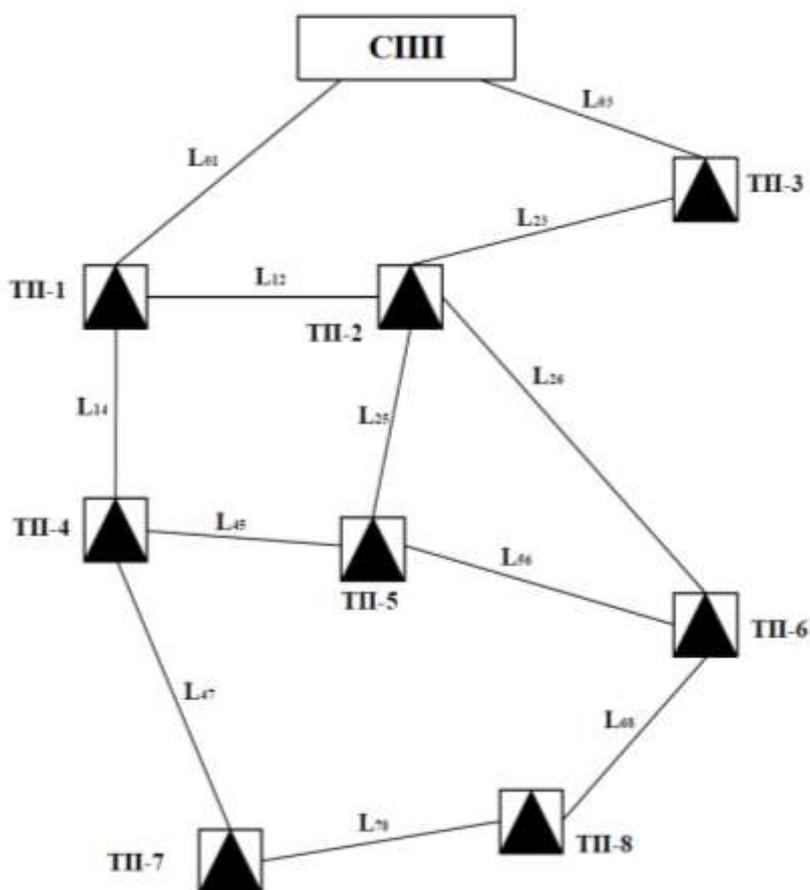


Рис. 1. Блок-схема кольцевой системы электроснабжения

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТОЧЕК РАЗРЫВА

Необходимо уточнить понятие «точка разрыва». Точкой разрыва будем считать разомкнутый коммутационный аппарат отходящей от трансформаторной подстанции (ТП) линии электропередачи. ЛЭП при этом находится под напряжением, так как только один из коммутационных аппаратов на одной из ТП разомкнут. Передача мощности по линии не осуществляется.

На представленной схеме (см. рис. 1) возможная комбинация вариантов точек разрыва и, соответственно, количество вариантов подключения ТП к сетевой понизительной подстанции (СПП) значительное, поэтому решить эту задачу можно с использованием генетических алгоритмов. Как известно, основная сложность применения генетических алгоритмов состоит в формализации задачи и приведения ее к необходимому виду.

В генетических алгоритмах необходимо определить и формализовать следующие понятия: функция жизнеспособности; популяция; особь, которая, в свою очередь, характеризуется геном. Также все промежуточные варианты построения структуры должны проверяться по пропускной способности линий, по потерям напряжения до тупиковой ТП, по отсутствию ТП, получающей питание от двух источников. Необходима также проверка оптимального варианта на предмет выполнения требований по надежности электроснабжения. В данном случае будем считать это ограничением и рассматривать только те варианты, которые выполняют соответствующие требования.

На рис. 1 помечены длины соответствующих линий, которые соединяют ТП. Для потоков мощности примем аналогичные обозначения:  $P_{12}$  – мощность, передаваемая по линии 12 от ТП1 к ТП2;  $P_1$  – мощность, потребляемая ТП1. Мощность ТП, длины линий и их сечение являются исходными данными, так как точки разрыва определяются для существующей структуры СЭС. Отметим, что в одной и той же линии в различных вариантах поток мощности может иметь разные величины и направления. Примем условно поток мощности со знаком плюс если он направлен от ТП с меньшим номером к ТП с большим номером, со знаком минус если наоборот. При наличии точки разрыва мощность по линии не передается и соответственно мощность равна нулю.

Таким образом, за отдельный ген примем линию электропередачи, состояние которой будет характеризоваться режимами работы 1, -1, 0 (где «1» – передача мощности от ТП с меньшим номером к ТП с большим номером, «-1» – передача мощности от ТП с большим номером к ТП с меньшим номером, «0» – линия на холостом ходу). При этом величину передаваемой мощности необходимо определять для каждой линии в ходе рассмотрения отдельного варианта при определении функции жизнеспособности [4]. Очевидно, что любой вариант функционирования структуры СЭС можно охарактеризовать режимами линий электропередачи. Пример описания представленной на рис. 1 структуры СЭС показан в табл. 1.

Таблица 1

Режимы работы линий электропередачи

№ ЛЭП	01	03	12	23	14	25	26	45	56	47	78	68
Состояние	1	1	0	1	1	0	1	0	-1	1	0	1

Данный вариант удовлетворяет требованию одностороннего питания для всех ТП. Он характеризуется набором состояний ЛЭП (генами). Представленная таблица позволяет от отдельного гена перейти к особи – варианту функционирования СЭС с заданными выше ограничениями к структуре (жизнеспособная особь), если ограничения не выполняются, то особь не жизнеспособная и должна исключаться из дальнейшего рассмотрения. Вариантов, которые имеют различные точки разрыва для представленной схемы может быть достаточно большое количество. Суммарные потери электроэнергии в линиях с учетом выражения для потерь мощности в отдельной линии (4) определяются по выражению

$$\Delta W_{\text{ЛЭП}}^{\Sigma} = \sum_i^n \Delta P_i \cdot \tau_i, \quad (5)$$

где  $\Delta P_i$  – потери мощности в  $i$ -й линии;  
 $\tau_i$  – время потерь для  $i$ -й линии.

Необходимо решить задачу: определить вариант с наименьшими суммарными потерями электроэнергии в линиях электропередачи.

Выражение (5) называется функцией жизнеспособности отдельной особи [4]. Вычисление этой функции позволяет характеризовать рассматриваемый вариант (особь) и сравнивать его с другими вариантами (особьями).

Анализируемое множество вариантов (их количество задается при формировании начального множества) называется популяцией. Рассматриваемую популяцию можно характеризовать матрицей, которая определяет характеристику каждой особи (строка матрицы):

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

На первом этапе необходимо сформировать несколько исходных вариантов построения СЭС (формирование исходной популяции, которая включает в себя отдельные особи-варианты), определить экономические показатели каждого варианта – значение функции жизнеспособности каждой особи. Варианты (особи), которые имеют низкие экономические показатели (значение функции жизнеспособности), исключаются из дальнейшего рассмотрения, после этого формируется новая популяция. Новые особи могут получаться из существующих путем скрещивания, случайными мутациями и т. п. После проверки вновь полученных особей на жизнеспособность (выполнение ограничений) формируется новая популяция и вычисляются значения функции жизнеспособности, затем процесс повторяется. За критерий получения наилучшего варианта могут быть приняты или количество итераций (количество поколений), которое задается при постановке задачи, или величина уменьшения целевой функции на предыдущем и последующем этапах.

В общем случае методика решения задачи по определению оптимальных точек разрыва с использованием генетических алгоритмов представлена на рис. 2. Необходимо уточнить, что блок № 2 может быть реализован различными способами. Самый очевидный, но не самый простой, это в результате анализа схемы СЭС (см. рис. 1) сформировать несколько вариантов точек разрыва и в дальнейшем использовать их в качестве исходной популяции. Такой способ достаточно затратный с точки зрения временных ресурсов, так как для исходной популяции требуется несколько десятков особей. Другой подход, как правило, применяется при составлении программного обеспечения и заключается в генерировании произвольных точек разрыва (особей), которые затем проверяются на выполнение ограничений (на жизнеспособность). В дальнейшем для исходной популяции используются только жизнеспособные особи.

Одной из особенностей генетического алгоритма является то, что наилучшее значение функции жизнеспособности не потеряется в результате перехода к следующей популяции, так как на каждом этапе смены популяций используется «элита» плюс вновь полученные особи.

В качестве решения задачи имеется возможность получить несколько вариантов, а лицо, принимающее решение, будет выбирать из них, используя дополнительные критерии.

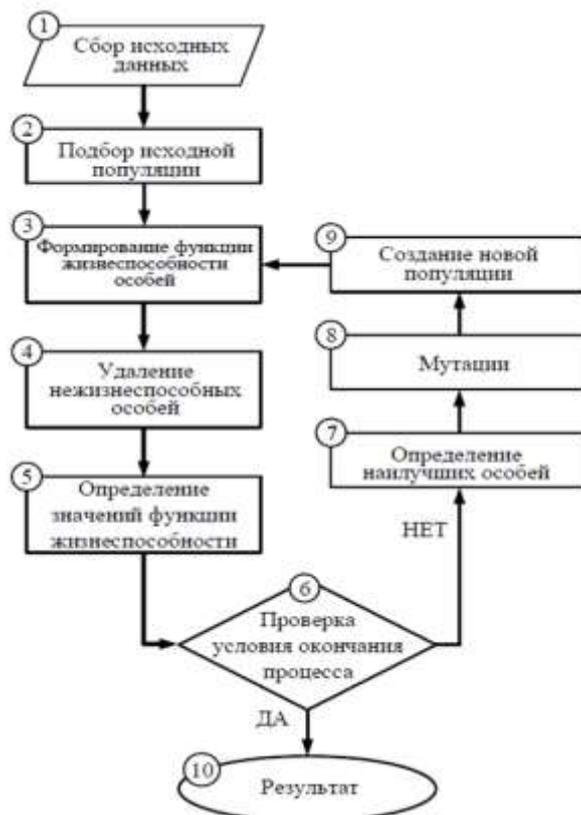


Рис. 2. Алгоритм определения точек разрыва

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к определению точек разрыва в сложно замкнутых сетях позволяет найти такой режим работы линий электропередачи между трансформаторными подстанциями, при котором потери электроэнергии в линиях будут минимальны. При изменении режимов работы трансформаторных подстанций (графиков нагрузок) предложенная методика позволяет определить новые оптимальные (с точки зрения минимума потерь электроэнергии) точки разрыва. Представленный алгоритм может быть реализован в среде MatLAB с использованием встроенных функций, реализующих генетические алгоритмы.

## Список используемых источников

1. Данилов Н. И., Щелоков Я. М. Основы энергосбережения: учебник / под ред. Н. И. Данилова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.
2. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: НЦЭНАС, 2002. – 208 с.
3. Методические рекомендации по определению потерь электрической энергии в городских электрических сетях напряжением 10(6)-0,4 кВ [утв. заместителем председателя Госстроя России 23.04.01] / PAO «Роскоммунэнерго»; ЗАО «АСУ Мособлэлектро». – 2001. – URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/45> (дата обращения: 21.01.2021).
4. Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е. Применение генетических алгоритмов при определении наилучших наборов мероприятий для обеспечения заданного уровня надежности электрообеспечения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 42–48.

А. Е. Воронин,  
*кандидат технических наук;*  
Н. Е. Пешехонов,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
В. В. Рыбаков,  
*кандидат технических наук*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

Проведен анализ различных режимов работы резервного источника электроснабжения с целой кратностью резервирования для невозстановливаемых систем. Представлены подходы к оценке надежности системы электроснабжения с различными режимами работы резерва с учетом особенностей функционирования дизель-генератора. Произведен расчет вероятности безотказной работы различных вариантов резервирования системы электроснабжения в период необходимости повышенного уровня надежности электроснабжения ответственных потребителей.

Ключевые слова: надежность системы электроснабжения, резервный источник электроснабжения, режимы работы резерва, дизель-электростанция.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Главными задачами обеспечения нормативной надежности системы электроснабжения (СЭС) объекта являются количественная оценка показателя надежности, проверка его соответствия заданным значениям и разработка мероприятий по повышению надежности, если эти требования не удовлетворяются.

Как известно, существуют различные методы и средства повышения надежности электроснабжения, например:

- применение элементов СЭС с повышенными показателями надежности;
- резервирование основных элементов СЭС;
- использование в СЭС резервных источников электроснабжения (РИЭС);
- выбор рациональной периодичности и объема контроля состояния элементов СЭС;
- применение устройств релейной защиты и автоматики и т. д.

Реализация указанных мероприятий может осуществляться при проектировании, изготовлении и в процессе эксплуатации СЭС. Перечень технических мероприятий по повышению надежности СЭС должен быть обоснован с учетом рациональной схемы электроснабжения, которая разрабатывается на основе схемных решений, сконцентрировавших в себе богатый опыт проектирования, строительства и эксплуатации.

Высокий уровень надежности структурно-сложных технических систем не всегда возможно достичь путем применения элементной базы с повышенными надежностными характеристиками. Данная задача может быть решена только при использовании различных видов резервирования (структурное, временное, функциональное, нагрузочное).

Существенно понизить вероятность отказов СЭС возможно путем включения в ее состав структурной избыточности с применением РИЭС. Задачей введения избыточности является обеспечение нормального функционирования СЭС объекта после возникновения отказа в его элементах.

В качестве РИЭС могут быть использованы газопоршневые, газотурбинные, дизельные агрегаты. Дизельные электростанции (ДЭС) на сегодняшний день являются наиболее массо-

выми и апробированными в техническом отношении установками. В сравнении с другими РИЭС дизельные агрегаты имеют ряд преимуществ: экономичный расход топлива; большой диапазон возможных мощностей; большая долговечность, связанная с меньшей скоростью вращения двигателя; простота и удобство в эксплуатации и т. д. Основным достоинством ДЭС в рамках импортозамещения является то, что выпускаются они многими предприятиями России.

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДЭС В КАЧЕСТВЕ РЕЗЕРВА

По режиму работы резервных элементов различают нагруженный, ненагруженный и облегченный резервы, которые могут применяться как в невосстанавливаемых, так и в восстанавливаемых системах.

Под восстановлением понимаются операции идентификации отказа (определения его места и характера), замены, регулировки и последующего контроля состояния отдельных элементов и работоспособность системы в целом [1].

СЭС в зависимости от условий применения объекта, который обеспечивается электроэнергией (ЭЭ), можно считать, как восстанавливаемой, так и невосстанавливаемой системой. В отдельных случаях объект потребления ЭЭ невозможно или нецелесообразно восстанавливать в силу его физических или конструктивных особенностей. Возможны и случаи, когда объект может быть физически и конструктивно восстанавливаемым, но вследствие недоступности, отсутствия обслуживающего персонала, недостатка времени на эти процессы и т. п. объект и систему его электроснабжения необходимо считать невосстанавливаемыми.

Например, имеется объект, являющийся восстанавливаемым, с технологическим циклом, в котором присутствует наиболее ответственная операция, требующая непрерывного обеспечения ЭЭ в заданный временной интервал. Отказ СЭС может повлечь за собой угрозу для жизни людей или расстройство сложного технологического процесса. В этом случае СЭС целесообразно считать невосстанавливаемой.

Как правило, РИЭС применяются в качестве третьего независимого источника питания для особой группы электроприемников. Таким образом, анализ влияния различных режимов работы РИЭС целесообразно проводить для невосстанавливаемых систем за определенный временной промежуток.

**Нагруженный резерв.** При данном режиме резервный элемент 2 работает в тех же условиях, что и основной 1. Расчетно-логическая схема для оценки надежности системы  $P_c(t)$  с нагруженным резервом представлена на рис. 1. На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $P_1(t)$  – вероятность безотказной работы основного элемента;  $P_2(t)$  – вероятность безотказной работы резервного элемента системы за заданный временной промежуток  $t$ .

В качестве примера нагруженного резерва можно привести параллельную работу двух ДЭС как автономного источника. При отказе одной из них другая ДЭС принимает на себя всю нагрузку (предполагается, что показатель безотказности ДЭС не зависит от нагрузки, а мощность каждой достаточна для ее покрытия). Также нагруженный резерв можно представить, когда имеется радиально дублированная схема питания ЭЭ и по одной из ветви часть потребителей объекта питается от государственной энергосистемы, а по другой ветви оставшаяся часть потребителей получает ЭЭ от ДЭС.

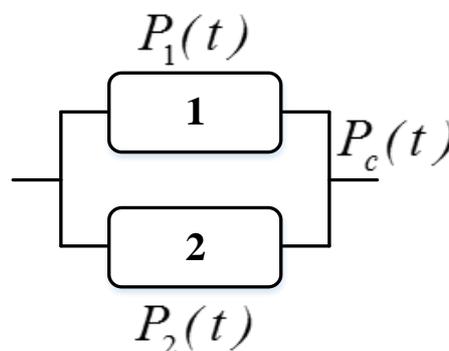


Рис. 1. Расчетно-логическая схема системы из двух элементов при нагруженном резерве

Данная система может отказать только при отказе основного и резервного элемента. Считая, что отказы элементов являются независимыми событиями, вероятность безотказной работы за заданный временной промежуток  $P_c(t)$  для системы, состоящей из  $n$  элементов с целой кратностью (один основной элемент резервируется одним или более резервными элементами), будет равна

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)), \quad (1)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

**Ненагруженный резерв.** При ненагруженном резерве резервные элементы находятся в отключенном состоянии и включаются в работу при отказе основных. На рис. 2 представлена расчетно-логическая схема системы, состоящей из основного 1 и резервного 2 элементов. При расчете показателя надежности системы в данном режиме работы резерва принимается

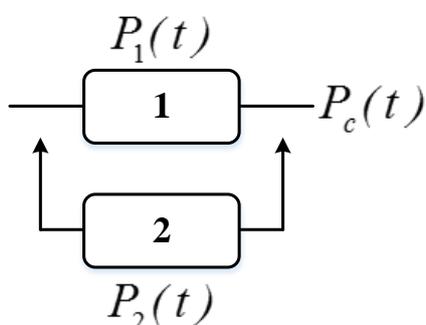


Рис. 2. Расчетно-логическая схема системы из двух элементов при ненагруженном резерве

допущение: до момента включения в работу резервные элементы отказать не могут, а замена отказавшего элемента резервным производится мгновенно с помощью устройства включения резерва.

Представленный режим работы резерва является наиболее распространенным для СЭС, в состав которых входят ДЭС в качестве резервных источников ЭЭ.

Для оценки надежности СЭС с ненагруженными ДЭС имеются ряд особенностей. В большинстве случаев ДЭС в данном режиме находится в резерве («горячий» или «холодный») и автоматически включается в работу при аварийных отключениях электропитания от основного источника (государственной энергосистемы). При восстановлении основного источника

энергии последний немедленно включается в работу, а ДЭС вновь переходит в резерв. В этом случае при оценке надежности СЭС необходимо в расчетную формулу подставлять вероятность безотказной работы ДЭС за временной промежуток, равный максимальному времени восстановления элемента рассматриваемой СЭС,  $T_{в \max \text{эл.}}$ .

Имеется еще важная особенность оценки надежности при ненагруженном резерве от других режимов работы резерва. Для обеспечения автоматического подключения ДЭС при отказе основного источника используют блок запуска и подключения резерва в сеть. Данный блок, в свою очередь, имеет отказы различного характера, которые выводят из строя всю резервную группу [2]. Этот факт также необходимо учитывать при оценке надежности. Для уменьшения вероятности отказа данного блока необходимо периодически производить его контрольные проверки путем запуска ДЭС, что позволит выявить скрытые дефекты данного блока.

Учитывая представленные особенности ненагруженного режима работы резерва в СЭС с целой кратностью можно выполнить расчет надежности системы с помощью выражения

$$P_c(t) = 1 - (1 - P_1(t)) \cdot \prod_{i=1}^{n-1} (1 - P_{2i}(T_{в \max \text{эл.}})) \cdot (1 - P_{БВР}(t)), \quad (2)$$

где  $P_1(t)$  – вероятность безотказной работы основного элемента (государственная энергосистема);

$P_{2i}(T_{в \max \text{эл.}})$  – вероятность безотказной работы резервных  $i$ -х элементов (ДЭС) за максимальное время восстановления элемента рассматриваемой СЭС

$$T_{\text{в макс эл.}};$$

- $n$  – общее число элементов в системе;  
 $P_{\text{БВР}}(t)$  – вероятность безотказной работы блока запуска и подключения резерва.

**Облегченный резерв.** При данном режиме работы резерва резервные элементы находятся в менее нагруженном состоянии, чем основной элемент, до момента его отказа. Во время ожидания в облегченном режиме резервные элементы могут отказать, но с вероятностью, меньшей, чем в нагруженном резерве (рис. 3).

На рис. 3 обозначение  $P_2'(t)$  – это вероятность безотказной работы резервного элемента в облегченном резерве, значение которой больше вероятности безотказной работы резервного элемента в нагруженном резерве  $P_2(t)$ :

$$P_2'(t) > P_2(t). \quad (3)$$

Выражение (3) следует из того, что при номинальной нагрузке ДЭС время наработки до отказа  $T_0$  в соответствии с ГОСТ 20439-87 [3] должно быть не менее 1000 часов, а при облегченном режиме работы ДЭС  $T_0'$  будет возрастать. Это связано с тем, что основные узлы и агрегаты ДЭС в последнем случае функционируют в «щадящем» режиме. Выражение (3) справедливо и для времени наработки до отказа, так как известна следующая зависимость:

$$P(t) = e^{-\frac{1}{T_0}t}. \quad (4)$$

Применительно к ДЭС облегченный резерв реализуется следующим образом. В нормальном режиме функционирования энергосистемы к дизельным станциям подключается часть потребителей, совокупная мощностью которой значительно меньше номинальной мощности станции. При отказе основного источника питания к ДЭС подключают всех остальных потребителей ЭЭ. В данном примере основной и резервный источник ЭЭ должны быть подключены к разным секциям шин, чтобы исключить возможное негативное влияние друг на друга.

В инструкции по эксплуатации на ДЭС, как правило, рекомендована минимальная нагрузка станции, которая должна быть не менее 30% от номинальной мощности ДЭС, так как в противном случае это негативно сказывается на работе дизельного двигателя и на его моторесурсе (повышенный износ элементов двигателя из-за неоптимального теплового режима работы, уменьшается точность регулировки скорости вращения двигателя в установившихся и динамических режимах работы, коксование сопел форсунки, повышается нагароотложение на стенках камер сгорания и т. д.). Не всегда есть возможность реализовать данное требование. В связи с этим облегченный режим работы ДЭС в качестве резерва на практике применяется крайне редко, но имеет место быть.

В вероятностной функции надежности системы с облегченным режимом работы резерва, в отличие от ненагруженного, отсутствует вероятность безотказной работы блока запуска и подключения резерва, так как ДЭС в этом режиме уже находится в работе, а коммутация оставшихся потребителей в аварийном режиме производится за счет элементов СЭС, надежность которых учтена в безотказности основного источника. Таким образом, вероятностная функция надежности системы с облегченным режимом работы резерва имеет вид

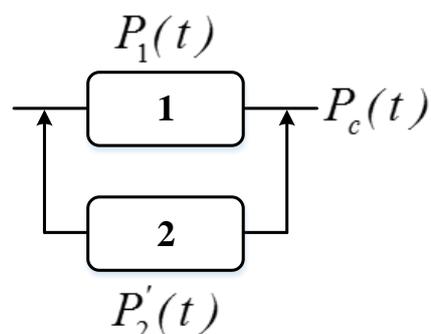


Рис. 3. Расчетно-логическая схема системы из двух элементов при облегченном резерве

$$P_c(t) = 1 - (1 - P_1(t)) \cdot \prod_{i=1}^{n-1} (1 - P_{2i}'(t)), \quad (5)$$

где  $P_{2i}'(t)$  – вероятность безотказной работы резервного элемента в облегченном резерве.

### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ РЕЗЕРВА

Рассмотрим объект, получающий электропитание от СЭС с радиальной дублированной схемой (рис. 4).

В процессе выполнения сложного непрерывного технологического процесса присутствует ответственная операция, требующая повышенного уровня надежности обеспечения ЭЭ в заданный временной интервал, равный 72 ч. Две ДЭС подключены на уровне 0,4 кВ и рассчитаны каждая на половину номинальной мощности потребителя ЭЭ, т. е. кратность резервирования является целой (элементы 1 и 2 являются основным источником ЭЭ, элементы 24 и 27 резервным). Оценка надежности будет осуществляться в точке подключения блока автоматического переключения (БАП) к потребителям ЭЭ.

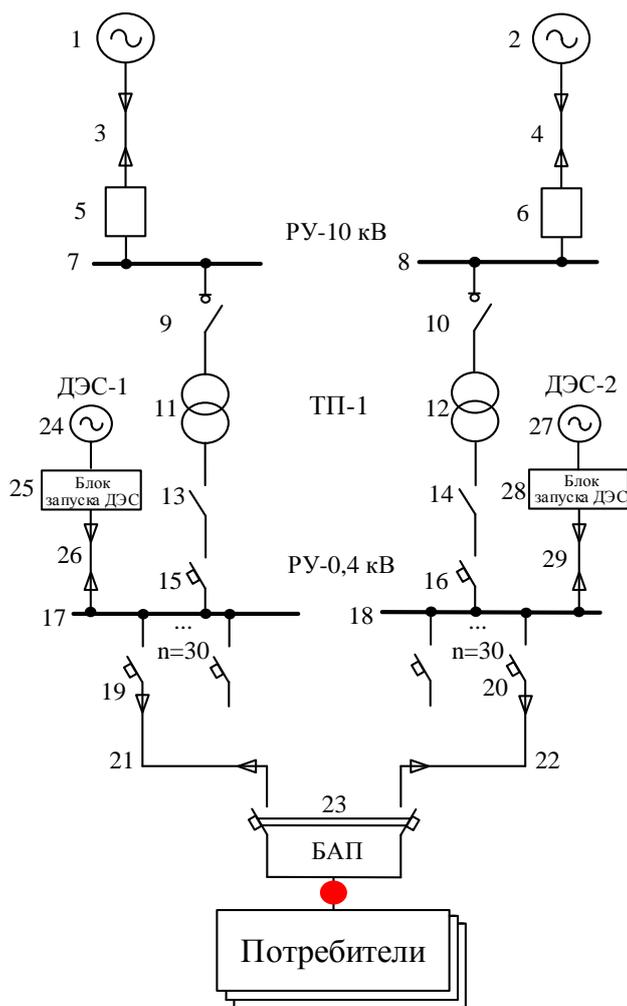


Рис. 4. Расчетная схема оценки надежности системы электроснабжения объекта с резервными ДЭС

На рис. 4 пронумерованы элементы СЭС, значения показателей надежности которых взяты из справочной литературы [4, 5] и приведены в табл. 1. Вероятность безотказной работы источников питания от государственной сети (элементы 1 и 2) принята в соответствии с работой [6], где ученые рассчитали и показали современный уровень надежности ряда энергосистем России.

Таблица 1

**Вероятность безотказной работы элементов СЭС**

Номер элемента на схеме	$P_i(t)$ , $t = 72$ часа	Номер элемента на схеме	$P_i(t)$ , $t = 72$ часа
1	0,999579	16	0,999589
2	0,999579	17	0,999942
3	0,997734	18	0,999942
4	0,997734	19	0,999589
5	0,999967	20	0,999589
6	0,999967	21	0,999918
7	0,999975	22	0,999918
8	0,999975	23	0,999819
9	0,999918	24	0,930531
10	0,999918	25	0,999753
11	0,999901	26	0,999924
12	0,999901	27	0,930531
13	0,999996	28	0,999753
14	0,999996	29	0,999924
15	0,999589		

Для оценки эффективности резервирования системы электроснабжения ДЭС в различных режимах их функционирования рассмотрим различные варианты применения резерва.

*Вариант 1.* Потребитель получает питание по двум вводам только от основного источника (элементы 1 и 2).

*Вариант 2.* Потребитель получает питание по двум вводам только от резервного источника (элементы 24, 27). При этом надежность блока запуска и подключения резерва в сеть не учитывается, так как ДЭС в этом варианте уже запущены и выдают мощность в сеть.

*Вариант 3.* Потребитель получает питание по первому вводу от основного источника (элемент 1), а по второму вводу от резервного источника (элемент 27). ДЭС в этом случае функционирует в режиме нагруженного резерва, следовательно, вероятность безотказной работы принимается за 72 часа (длительность проведения ответственной операции).

*Вариант 4.* Потребитель получает питание по двум вводам от основного источника (элементы 1 и 2), а резервный источник питания (элементы 24, 27) находятся в режиме ненагруженного резерва. В этом случае при оценке надежности СЭС необходимо в расчетную формулу подставлять вероятность безотказной работы ДЭС за временной промежуток, равный максимальному времени восстановления элемента рассматриваемой СЭС  $T_{в \max \text{эл.}}$ . Проанализировав элементы данной СЭС (см. рис. 4) сделан вывод, что максимальное время восстановления элемента составляет 12 часов. Также в этом варианте необходимо учесть надежность блока запуска и подключения резерва в сеть (элементы 26, 29).

*Вариант 5.* Потребитель получает питание по двум вводам от основного источника (элементы 1, 2) и по двум вводам от резервного источника (элементы 24, 27), функционирующего в облегченном резерве.

Учитывая, что в нагруженном режиме резерва время наработки до отказа  $T_o$  ДЭС принимается равным 1000 часов [3], тогда в облегченном режиме резерва это время увеличится. В этом случае время наработки до отказа  $T'_o$  ДЭС примем равным 1500 часов. Тогда, в соответствии с выражением (4), вероятность безотказной работы ДЭС (элементы 24, 27) за 72 часа будет принимать значения не 0,930531, а 0,953133.

Результаты оценки надежности СЭС с различными вариантами работы резерва приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты оценки надежности СЭС с различными вариантами работы резерва

№ варианта	Условие варианта	$P_{СЭС}(t)$ , $t = 72$ часа
1	Два ввода от государственной сети (элементы 1, 2)	0,9998041
2	Два ввода от ДЭС в нагруженном резерве (элементы 24, 27)	0,9949128
3	1-й ввод от государственной сети (элемент 1), 2-й ввод от ДЭС в нагруженном резерве (элемент 27)	0,9995469
4	Два ввода от государственной сети (элементы 1, 2), два ввода от ДЭС в ненагруженном резерве (элементы 24, 27)	0,9998188
5	Два ввода от государственной сети (элементы 1, 2), два ввода от ДЭС в облегченном резерве (элементы 24, 27)	0,9998187

Из результатов оценки видно, что ДЭС в виду своего низкого уровня надежности по отношению к государственной сети использовать в качестве основного источника не целесообразно при низкой кратности резервирования.

Деление радиальной дублированной схемы СЭС для реализации питания от разных источников питания с отличными ПН не всегда приводит к увеличению показателя надежности СЭС в целом. Выигрыш в надежности может быть в случае, когда показатель надежности РИЭС выше основного источника.

Вероятность безотказной работы СЭС с ненагруженным режимом работы резерва является наиболее предпочтительной. Это объясняется следующим: при нахождении ДЭС в режиме ожидания ее моторесурс не уменьшается; ДЭС включается только на время устранения отказа основного источника. Приведенные факты указывают на уменьшение вероятности отказа ДЭС в ненагруженном резерве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав полученные зависимости и результаты оценки надежности СЭС с различными режимами функционирования РИЭС, можно сделать следующие выводы.

1. Вероятность безотказной работы резервированной системы всегда больше, чем у нерезервированной, причем выигрыш надежности зависит уровня надежности РИЭС и кратности резервирования.

2. С точки зрения увеличения уровня надежности СЭС с резервом ненагруженный резерв имеет показатель надежности выше, чем облегченный, а облегченный еще выше, чем нагруженный.

3. При ненагруженном режиме работы резерва учет блока запуска и подключения резерва в сеть, который имеет относительно высокий показатель надежности, не приводит к значительным изменениям результатов оценки. Доминирующее влияние на надежность работы резерва в данном режиме оказывает непосредственно уровень надежности дизель-генератора.

4. Помимо различных режимов работы резервной ДЭС на общую надежность СЭС будет оказывать влияние и место ее размещения. Чем ближе к потребителю РИЭС будет расположен, тем уровень надежности электроснабжения данного потребителя будет возрастать при неизменной структуре СЭС.

### Список используемых источников

1. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 23 с.

2. *Аполлонский С. М., Куклев Ю. В.* Надежность и эффективность электрических аппаратов: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2011. – 448 с.

3. ГОСТ 20439–1987. Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Требования к надежности и методы контроля. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 18 с.

4. *Герасимова В. Г.* Использование электрической энергии: электротехнический справочник. – 9-е изд. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – Т. 3. – 964 с.

5. Надежность электроэнергетических систем: справочник / Н. И. Воропай [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – Т. 2. – 568 с.

6. *Овсейчук В. А.* Надежность и качество электроснабжения потребителей // Новости электротехники. – 2013. – № 3(81). – С. 50–53.

В. А. Горин,  
кандидат технических наук;  
В. В. Карагодин,  
доктор технических наук, профессор;  
И.В. Хомич

## ПОСТРОЕНИЕ И РАСЧЕТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Обоснована возрастающая роль систем автономного электроснабжения в обеспечении надежного электроснабжения наземных комплексов Космических войск, в которых в настоящее время все активнее применяются бесщеточные синхронные генераторы, обладающие рядом преимуществ.

Разработана математическая модель бесщеточного синхронного генератора в среде *Simulink* математического пакета *MatLab* по уравнениям Парка – Горева. Математическая модель включает модель синхронного генератора и бесщеточного возбудителя. Представлен расчет основных параметров полученной модели. Полученная математическая модель позволит расширить арсенал средств, используемых при проведении математического моделирования систем электроснабжения наземных комплексов в среде *Matlab*, и возможности исследования систем автономного электроснабжения, повысить наглядность получаемых результатов.

Ключевые слова: бесщеточный синхронный генератор, математическая модель, уравнения Парка – Горева, переходные процессы.

### ВВЕДЕНИЕ

Надежность, непрерывность и устойчивость функционирования, постоянная готовность к применению по назначению наземных комплексов (НК) Космических войск (КВ) в значительной мере определяются энерговооруженностью, надежностью электроснабжения и качеством электроэнергии систем электроснабжения НК КВ в различных условиях оперативно-стратегической обстановки. Значительная роль в обеспечении надежного электроснабжения и качества электроэнергии принадлежит системам автономного электроснабжения (САЭ). Необходимость применения САЭ обуславливается также современной тенденцией развития российской электроэнергетики, для которой характерно привлечение потребителей (юридических и физических лиц, осуществляющих использование электрической энергии) к решению вопросов обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии [1].

В большинстве случаев в САЭ в качестве источников электроэнергии применяются дизель-генераторные агрегаты (ДГА), представляющие энергетическую установку, состоящую из первичного двигателя – дизеля и синхронного генератора (СГ). ДГА для осуществления надежного электроснабжения должны обеспечивать требования стандартов или технических условий на электростанциях конкретных типов к автоматическому поддержанию заданных параметров, как в статических, так и в динамических (переходных) режимах.

Исследование динамических режимов САЭ возможно с использованием такого современного инструмента научных исследований, как метод математического моделирования с применением различных программных комплексов моделирования, среди которых все большее распространение получает пакет моделирования *Matlab/Simulink*. Для этого необходимо располагать математической моделью САЭ, которая позволит провести анализ возможных динамических режимов.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

При исследовании динамических процессов в автономных системах электроснабжения методом математического моделирования необходимо получить математические модели (уравнения) элементов системы: СГ с автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ), первичных двигателей генераторных агрегатов с автоматическими регуляторами скорости вращения, статической нагрузки, асинхронных приводов, соединительных линий и уравнений связи. Далее преобразовать их к общей системе уравнений, приспособленной для решения поставленной задачи исследований.

Учитывая, что синхронные генераторы являются наиболее сложными динамическими элементами систем электроснабжения, в рамках данной статьи ограничимся получением математической модели СГ в математическом пакете *Matlab/Simulink*. При этом в качестве силового генератора будем рассматривать бесщеточный синхронный генератор (БСГ). Применение генераторов данного типа в силу ряда присущих им преимуществ (повышенная надежность, лучшие эксплуатационные характеристики) получило широкое распространение в системах электроснабжения различных объектов.

Для получения математической модели синхронного генератора в пакете *Matlab/Simulink* используем широко применяемую для этих целей систему уравнений Парка – Горева в системе  $d$ - $q$  координат [2, 3]:

$$\begin{aligned}
 p\Psi_d/w_0 + \Psi_q(1+s) - ri_d &= u_d; \\
 \Psi_d(1+s) - p\Psi_q/w_0 - ri_q &= u_q; \\
 T_{d0}p\Psi_f + e_q &= u_f; \\
 T_{rd}p\Psi_{rd} + e_{rd} &= 0; \\
 T_{rq}p\Psi_{rq} + e_{rq} &= 0; \\
 T_jps + (\Psi_d i_q + \Psi_q i_d) &= M_m; \\
 \Psi_d &= -x_s i_d + e_{idH}; \\
 \Psi_f &= x_{fs} e_q / x_f + x_{ad} e_{idH} / x_f; \\
 \Psi_{rd} &= x_{rds} e_{rd} / x_{rd} + x_{ad} e_{idH} / x_{rd}; \\
 \Psi_q &= x_s i_q + e_q; \\
 \Psi_{rq} &= x_{rqs} e_{rq} / x_{rq} + x_{aq} e_q / x_{rq}; \\
 e_{idH} &= e_{id} h; \\
 e_{id} &= e_q - x_{ad} i_d + e_{rd}; \\
 e_q &= x_{aq} i_q + e_{rq}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

- Где  $x_d, x_q, x_{ad}, x_{aq}, x_{rd}, x_{rq}, x_f, x_{fs}, x_{rds}, x_{rqs}, T_{d0}, T_{rd}, T_{rq}, T_j, u_d, u_q, i_d, i_q, e_q, e_{rq}, e_{rd}, e_{id}, e_{idH}, \Psi_d, \Psi_q, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}, \Psi_f, h$  — параметры синхронного генератора, о.е.;
- $T_{d0}$  — постоянная времени обмотки возбуждения, сек;
  - $T_{rd}, T_{rq}$  — постоянные времени демпферных контуров, сек;
  - $T_j$  — постоянная времени инерции вала генератора, сек;
  - $u_d, u_q$  — напряжения СГ в осях  $d$  и  $q$ , о.е.;
  - $i_d, i_q$  — токи СГ в осях  $d$  и  $q$ , о.е.;
  - $e_q$  — э.д.с. возбуждения, равная току  $i_f$ , о.е.;
  - $e_{rq}, e_{rd}$  — э.д.с. демпферных контуров, равные токам  $i_{rq}, i_{rd}$ , о.е.;
  - $e_{id}$  — внутренняя э.д.с. СГ по оси  $d$ ;
  - $e_{idH}$  — внутренняя насыщенная э.д.с. СГ по оси  $d$ ;
  - $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}, \Psi_f$  — потокосцепления статорных, демпферных контуров по осям  $d$  и  $q$  и обмотки возбуждения;
  - $h$  — коэффициент насыщения.

Выполнив несложные преобразования, представим фазовые координаты в виде:

$$\begin{aligned}
 \psi_f &= (u_f - e_q) / T_{d0} p; \\
 e_q &= (1 + x_{ad} / x_{fs}) \psi_f - x_{ad} e_{idH} / x_{fs}; \\
 e_{idH} &= f(e_{id}) = a_H e_{id} / (b_H + e_{id}); \\
 e_{id} &= e_q - x_{ad} i_d + e_{rd}; \\
 u_d &= p \psi_d / w_0 + \psi_q (1+s) - r i_d; \\
 u_q &= \psi_d (1+s) - p \psi_q / w_0 - r i_q; \\
 \psi_d &= -x_s i_d + e_{idH}; \\
 \psi_q &= x_q i_q + e_{rq}; \\
 \psi_{rd} &= -e_{rd} / (p T_{rd}); \\
 \psi_{rq} &= -e_{rq} / (p T_{rq}); \\
 e_{rd} &= x_{rd} \psi_{rd} / x_{rds} - (x_f \psi_f - x_{fs} e_q) / x_{rds}; \\
 e_{rq} &= i_{rq} = \psi_{rq} - x_{aq}^2 i_q / x_{rq}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

На основе реализации уравнений (2) с помощью блочных компонентов библиотеки пакета *Simulink* представим модель синхронного генератора в виде структурной схемы [4].

Построение исследуемой модели представляет собой объединение необходимых стандартных блоков пакета в структуру с учетом функциональных связей между ними, задание параметров блоков и параметров моделирования.

В качестве примера на рис. 1 представлена структурная схема, реализующая первое уравнение системы (2). При этом использованы следующие блоки библиотеки: интегрирующий блок *Integrator*, усилитель *Gain*, блок вычисления суммы *Add*.

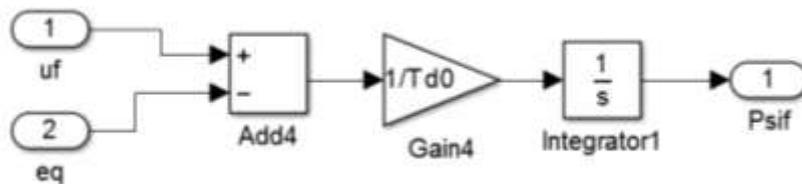


Рис. 1. Структурная схема для определения  $\psi_f$

Реализуя аналогичным образом остальные уравнения системы (2), получим с учетом функциональных связей между ними структурную схему модели синхронного генератора, представленную на рис. 2.

Учитывая специфику представления текстовой информации в *Simulink* на модели СГ (рис. 2), отдельные обозначения переменных и параметров обозначены следующим образом:  $\psi_f \equiv \text{Psif}$ ;  $\psi_d \equiv \text{Psid}$ ;  $\psi_q \equiv \text{Psiq}$ ;  $\psi_{rd} \equiv \text{Psird}$ ;  $\psi_{rq} \equiv \text{Psirq}$ .

Следует отметить некоторые особенности, которые были учтены при построении модели. При реализации слагаемых  $p\psi_d$  и  $p\psi_q$  в пятом и шестом уравнениях необходимо использовать блок вычисления производной *Derivative*. Однако его прямое использование при моделировании некоторых режимов (например, пуск асинхронного двигателя) может приводить к неустойчивым процессам моделирования. Для исключения подобных ситуаций вместо данного блока использована схема, представленная на рис. 3 (для случая  $p\psi_q$ ), которая реализует дифференцирующее звено с замедлением, имеющее передаточную функцию:

$$W_D(p) = \frac{p}{Tp + 1},$$

где  $T$  – постоянная времени,  $T = 1/k$ ;  
 $k$  – коэффициент усиления усилителя *Gain*.

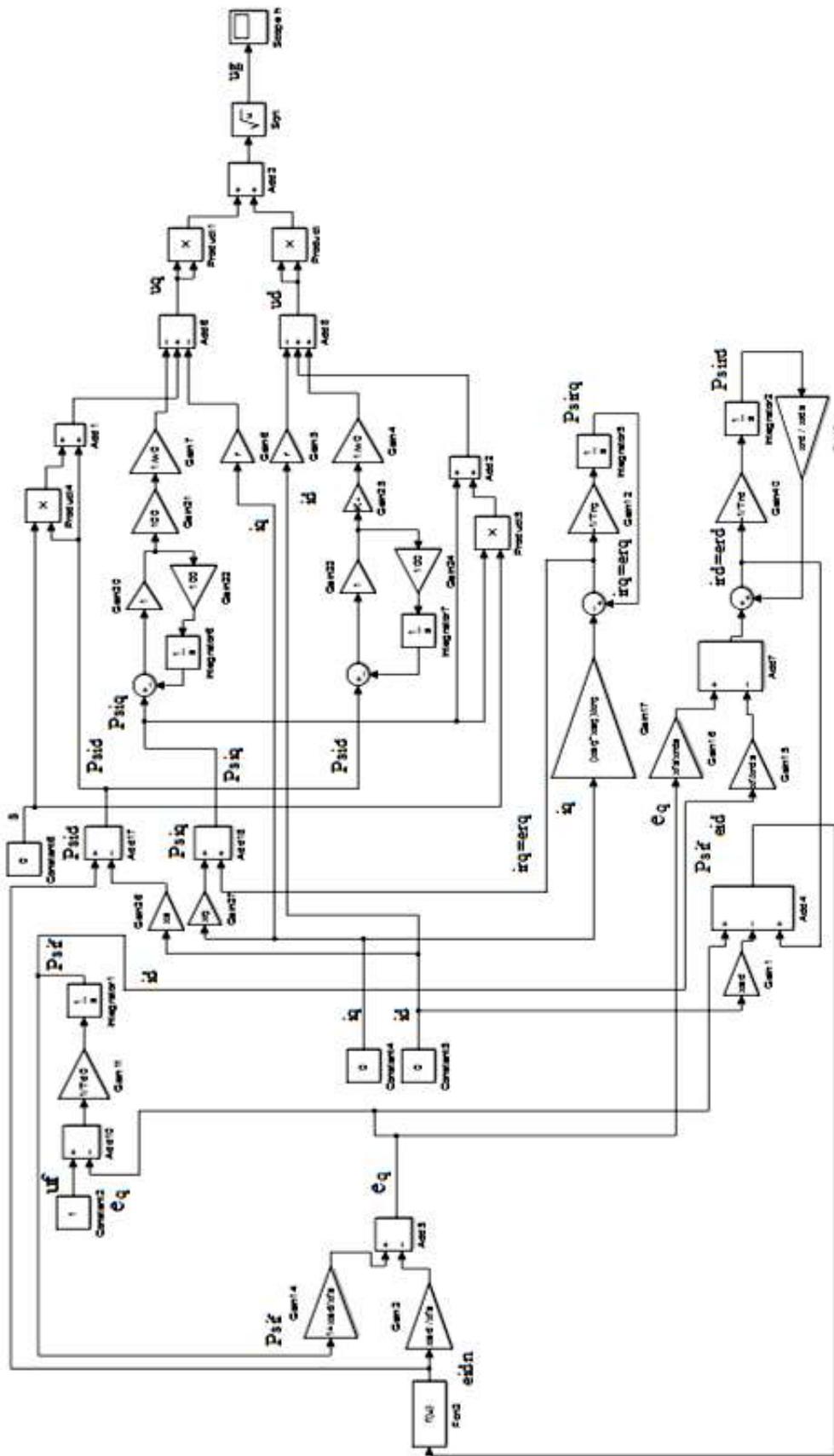


Рис.2. Математическая модель СТ

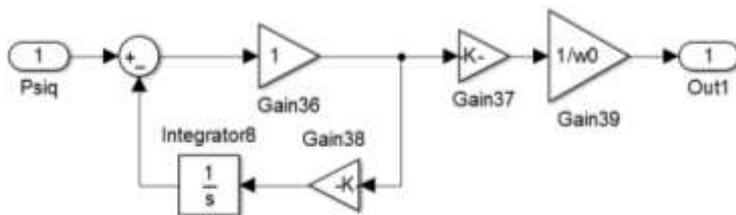


Рис.3. Математическая модель дифференцирующего звена

Выбирая значение коэффициента усиления  $k$  достаточно большим, удастся получить малое значение постоянной времени  $T$ , приближая данную структуру к идеальному дифференцирующему звену.

Зависимость  $h$  и  $e_{idh}$  от  $e_{id}$  аппроксимируется:  $e_{idh} = f(e_{id}) = a_n e_{id} / (b_n + e_{id})$ , где коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  подбираются из условия хорошего совпадения реальной и приближенной зависимостей.

Бесщеточный возбудитель представляет собой обращенный синхронный генератор, подключенный к обмотке возбуждения основного генератора через диодный преобразователь. Обращенный синхронный генератор можно описать системой уравнений Парка – Горева. При этом необходимо учитывать, что в этом случае машина является обращенной, поэтому оси в системе  $d-q$  координат связаны со статором, а не с ротором. Для описания переходных процессов в диодном выпрямителе при пренебрежении высшими гармониками токов и напряжений возбудителя переменного тока может быть использована его внешняя характеристика. Полная система уравнений, описывающая переходные процессы в возбудителе и преобразователе, является весьма громоздкой и не совсем удобной. Поэтому для математического описания бесщеточного возбудителя воспользуемся упрощенной линейной моделью, полученной путем эквивалентирования полной системы уравнений [5].

В этом случае уравнение, описывающее работу возбудителя, имеет вид

$$u_f = k_{1л} u_{fв} / (T_в p + 1) - (T_{в2} p + 1) k_{2л} e_q / (T_в p + 1), \quad (3)$$

- где  $u_f$  – напряжение возбуждения основного генератора, о.е.;
- $u_{fв}$  – напряжение возбуждения возбудителя, о.е.;
- $e_q$  – э.д.с. возбуждения основного генератора, равная току  $i_f$ , о.е.;
- $k_{1л}, k_{2л}$  – коэффициенты передачи;
- $T_в, T_{в2}$  – постоянные времени, сек.

Структурная схема, соответствующая уравнению (3), представлена на рис. 4.

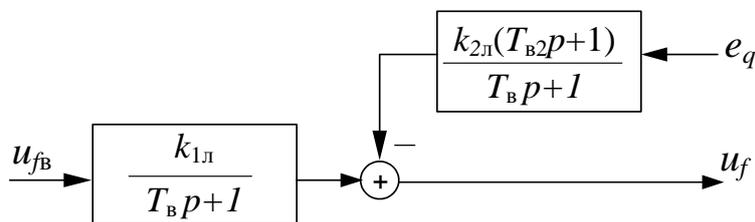


Рис. 4. Структурная схема линейной модели бесщеточного возбудителя

Несмотря на простоту, модель достаточно точно отражает динамические процессы в возбудителе, а ее параметры не зависят от режима работы синхронного генератора [5].

Модель бесщеточного возбудителя в виде структурной схемы *Simulink* представлена на рис. 5. На этом же рисунке показаны ее представление в виде подсистемы (SV) и окно параметров блока модели динамического объекта *State-Space*, описываемого уравнениями в пространстве состояний.

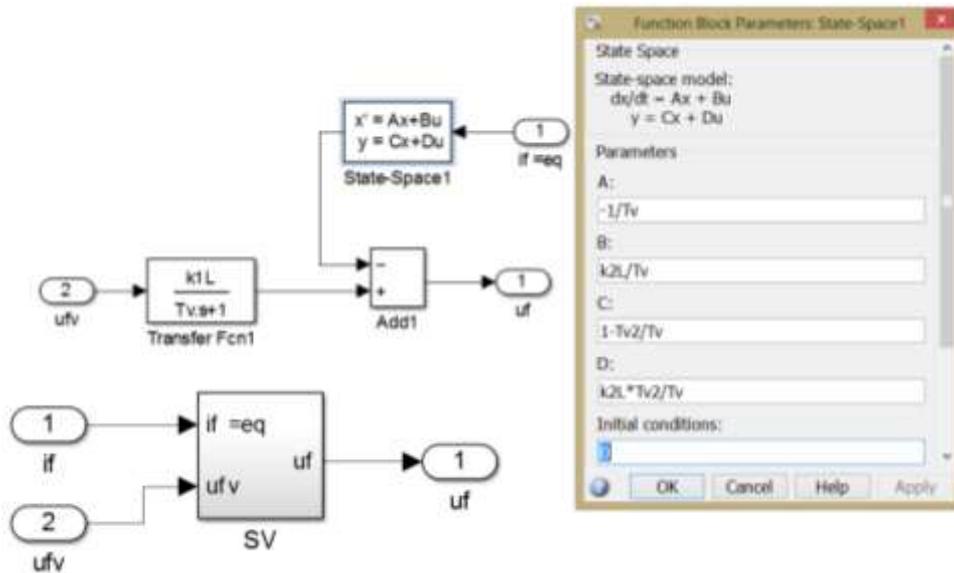


Рис. 5. Математическая модель бесщеточного возбудителя

Представив модель СГ (см. рис. 2) по полным уравнениям (1) в виде подсистемы (*SG\_poln*), модель бесщеточного синхронного генератора, включающая модели бесщеточного возбудителя и СГ, может быть представлена в виде, показанном на рис. 6.

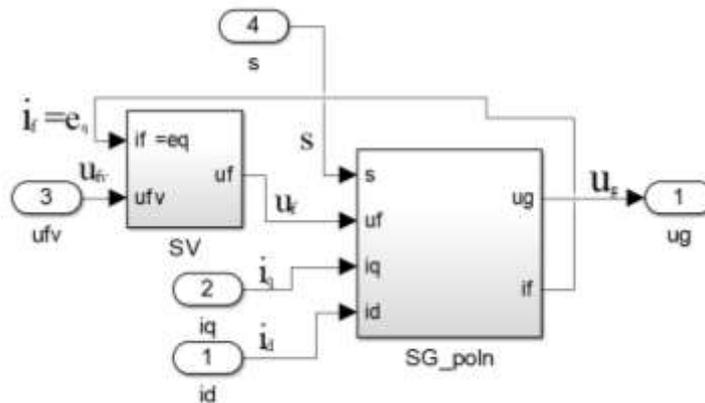


Рис.6. Математическая модель БСГ

Полученная математическая модель БСГ может быть использована при исследовании динамических процессов в автономных системах электроснабжения в качестве источника электроэнергии.

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕСЩЕТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Для представления уравнений синхронного генератора в относительных единицах в качестве базисных величин выбирают [3]:

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot U_{\text{ф.ном}}; I_0 = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ф.ном}}; z_0 = U_0 / I_0 = U_{\text{ф.ном}} / I_{\text{ф.ном}} \cdot$$

При таком выборе базисных величин удается получить коэффициенты уравнений в наиболее простом и наглядном виде.

Из технических условий и паспортных данных известны следующие параметры *синхронного генератора*:

- номинальная полная мощность  $S_{\text{НОМ}}$ , кВА;
- номинальная активная мощность  $P_{\text{НОМ}}$ , кВт;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальное напряжение генератора  $U_{\text{НОМ}}$ , В;
- синхронное индуктивное сопротивление обмотки по оси  $d$  (продольная синхронная реактивность)  $x_d$ ;  $x_d = x_{ad} + x_s$ , о.е.;
- синхронное индуктивное сопротивление обмотки по оси  $q$  (поперечная синхронная реактивность)  $x_q$ ;  $x_q = x_{aq} + x_s$ , о.е.;
- индуктивное сопротивление продольной реакции статора  $x_{ad}$ , о.е.;
- индуктивное сопротивление рассеяния  $x_s$ , о.е.;
- переходное продольное индуктивное сопротивление (переходная реактивность в продольной оси)  $x'_d$ , о.е.;
- сверхпереходное сопротивление (сверхпереходная реактивность в продольной оси)  $x''_d$ , о.е.;
- сверхпереходное сопротивление (сверхпереходная реактивность в поперечной оси)  $x''_q$ , о.е.;
- активное сопротивление фаз статора  $r$ , о.е.;
- постоянная времени цепи возбуждения при разомкнутой цепи статора  $T_{d0}$ , сек.

Для определения значений неизвестных параметров можно воспользоваться следующими соотношениями [3]:

- индуктивное сопротивление поперечной реакции статора:

$$x_{aq} = x_q - x_s;$$

- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения:

$$x_{fs} = \frac{x'_d - x_s}{1 - \frac{x'_d - x_s}{x_{ad}}};$$

- индуктивное сопротивление рассеяния демпферного контура по оси  $d$ :

$$x_{rds} = \frac{1}{\frac{1}{x''_d - x_s} - \frac{1}{x_{fs}} - \frac{1}{x_{ad}}};$$

- индуктивное сопротивление рассеяния демпферного контура по оси  $q$ :

$$x_{rqs} = \frac{1}{\frac{1}{x''_q - x_s} - \frac{1}{x_{aq}}};$$

- индуктивное сопротивление демпферного контура по оси  $d$ :

$$x_{rd} = x_{ad} + x_{rds};$$

- индуктивное сопротивление демпферного контура по оси  $q$ :

$$x_{rq} = x_{aq} + x_{rqs};$$

- сверхпереходное индуктивное сопротивление демпферного контура по оси  $d$ :

$$x''_{rd} = x_{rds} + \frac{1}{\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{ad}}};$$

- сверхпереходное индуктивное сопротивление демпферного контура по оси  $q$ :

$$x''_{rq} = x_{rqs} + \frac{1}{\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{ad}}};$$

– постоянная времени рассеяния демпферной обмотки по продольной оси:

$$T_{rd} = T_d'' \frac{x_{rd}}{x''_{rd}};$$

– постоянная времени рассеяния демпферной обмотки по поперечной оси:

$$T_{rq} = T_d'' \frac{x_{rq}}{x''_{rq}}.$$

Для среднестатистической характеристики холостого хода для СГ малой и средней мощности коэффициенты аппроксимации составляют  $a_H = 1,45$ ;  $b_H = 0,45$ .

Для модели *бесщеточного возбудителя* значения коэффициентов  $k_{1л}$ ,  $k_{2л}$  для режима нормальных нагрузок выпрямителя, как наиболее типичного, могут быть определены из следующих соотношений [5, 6]:

$$\begin{aligned} k_{1л} &= k_{1y} - l_1(-s_1 + (s_1^2(e_{qB0}/e_{q0}) + s_1 s_2)/g); \\ k_{2л} &= -l_2 + l_1(s_2 - (s_1 s_2(e_{qB0}/e_{q0}) + s_2^2 + 1/a)/g); \\ g &= \sqrt{s_1^2(e_{qB0}/e_{q0})^2 + 2s_1 s_2 e_{qB0}/e_{q0} + s_2^2 + 1/a}; \\ l_1 &= 3(x_{dB} - x_{qB})0.66/\pi; \quad l_2 = (1.05(x_{dB} - x_{qB}) + \sqrt{3}x_{qB})/\pi; \\ a &= 0.33\sqrt{3}(x_{qB} - x_{dB})/x_{qB}; \\ s_1 &= \sqrt{6}x_{ad}z_6/(1.32R_f(x_{dB} - x_{qB})); \quad s_2 = 0.265; \\ (e_{qB0}/e_{q0}) &= (1 + k_{2y})/k_{1y}; \\ k_{1y} &= k_1(I_{*fy}) = \frac{3\sqrt{6}x_{ad}z_6}{R_f\pi}; \\ k_{2y} &= (3B_{*1}(x_{dB} - x_{qB}) + \sqrt{3}x_{qB})/\pi; \\ B_{*1} &= 0.35 + 0.66I_{*f}. \end{aligned}$$

Постоянные времени модели бесщеточного возбудителя определяются следующим образом:

$$T_B = T_{B0} + T_{rdB};$$

$$T_{B2} = T_B(1 - k_{qy} k_{1л}/k_{2л}),$$

где  $T_{B0}$  – постоянная времени обмотки возбуждения возбудителя при разомкнутом якоре, сек;

$T_{rdB}$  – постоянная времени продольного демпферного контура, сек;

$x_{dB}$  – индуктивное сопротивление возбудителя по оси  $d$ , о.е.;

$x_{qB}$  – индуктивное сопротивление возбудителя по оси  $q$ , о.е.;

$x'_{dB}$  – переходное продольное индуктивное сопротивление возбудителя, о.е.;

$x_{ad}$  – индуктивное сопротивление продольной реакции статора основного генератора, о.е.

Сопротивления и постоянные времени синхронного возбудителя определяются из технических условий и паспортных данных.

Достоверность полученной модели подтверждается результатами моделирования, представленными на рис. 7.

При моделировании динамических режимов в САЭ использовались параметры синхронного генератора СБГ 800-750:  $U_{ном} = 400$  В;  $S_{ном} = 1000$  кВА;  $P_{ном} = 800$  кВт;  $\cos\varphi_{ном} = 0,8$ ;

$x_d = 1,59$ ;  $x_s = 0,089$ ;  $x_{ad} = 1,501$ ;  $x'_d = 0,24$ ;  $x_q = 1,06$ ;  $x''_d = 0,15$ ;  $x''_q = 0,185$ ;  $r = 0,01$ ;  $T_{d0} = 2,4$  с;  $T'_d = 0,36$  с;  $T''_d = 0,011$  с;  $T_{d0в} = 0,34$  с.

Расчет параметров линейной модели бесщеточного возбудителя СГ типа СБГ-800 дал следующие результаты:  $k_{1л} = 1,60$ ;  $k_{2л} = 0,61$ ;  $T_b = 0,34$  с;  $T_{b2} = 0,089$  с.

В качестве регулятора скорости первичного двигателя и регулятора возбуждения использовались пропорциональные регуляторы в виде апериодического звена первого порядка.

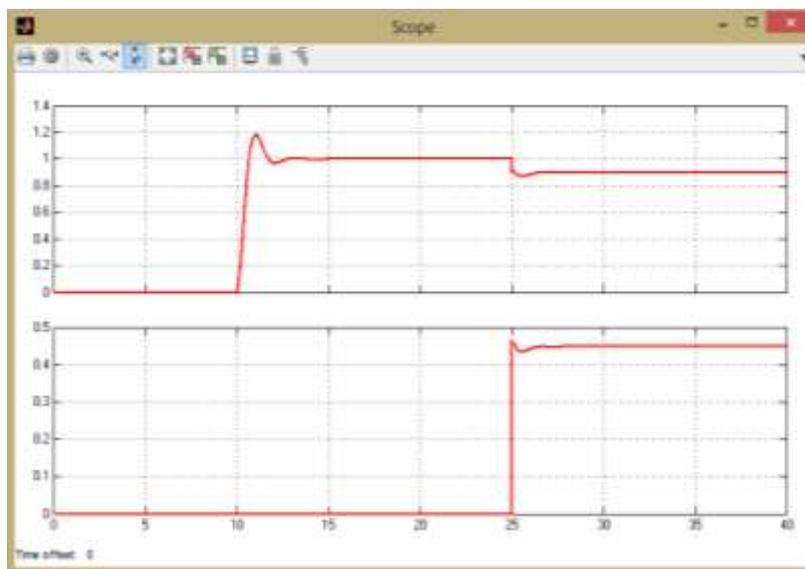


Рис. 7. Результаты моделирования БСГ

На рис. 7 показаны осциллограммы напряжения (верхний график) и тока (нижний график) генератора, характеризующие режимы работы БСГ. В течение времени до десятой секунды происходит выход первичного двигателя (дизеля) на номинальный режим вращения. На десятой секунде происходит подача напряжения  $u_{fv}$  на бесщеточный возбудитель и выход генератора на режим холостого хода. На 25 секунде подключается статическая активно-индуктивная нагрузка.

Приведенные результаты моделирования переходных режимов, полученные с использованием разработанной модели (см. рис. 6), соответствуют физике процессов в синхронной машине.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время в САЭ широко используются бесщеточные синхронные генераторы, обеспечивающие повышенные требования надежности и длительные сроки эксплуатации.

Учитывая данные обстоятельства, в среде *Matlab/Simulink* разработана по уравнениям Парка – Горева математическая модель бесщеточного синхронного генератора, как одного из наиболее сложных динамических элементов, которая может использоваться в качестве модели источника электроэнергии САЭ при исследовании в них статических и динамических режимов.

Представленная модель позволит расширить арсенал средств, используемых при проведении математического моделирования и исследования систем электроснабжения НК в среде *Matlab*, повысить наглядность и достоверность получаемых результатов.

### Список используемых источников

1. Основные положения (концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. – М.: ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
2. *Горев А. А.* Переходные процессы синхронной машины. – Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 552 с.
3. *Токарев Л. Н.* Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях. – Л.: Судостроение, 1980. – 119 с.
4. *Солонина А. И.* Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
5. *Юрганов А. А., Кожевников В. А.* Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.
6. Математическая модель возбудителя диодной бесщеточной системы возбуждения синхронного генератора / А. Н. Герасимов [и др.]; ВИКА имени А. Ф. Можайского. – СПб., 1996. – 35 с. – Деп. в ЦСИФ МО РФ 12.01.96, № Б 2774.

В. А. Горин,  
кандидат технических наук;  
В. В. Карагодин,  
доктор технических наук, профессор;  
И. В. Хомич

## РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ОДНОГО КЛАССА С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДЫ MATLAB

Широкое применение цифровой техники в системах управления делает возможным реализацию оптимальных законов управления, среди которых одним из важнейших является закон оптимального быстродействия. В настоящей статье рассматривается предлагаемый алгоритм нахождения оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами одного класса, построенный на основе применения метода последовательных опорных решений, и его программная реализация на языке программирования математического пакета *Matlab*.

Ключевые слова: оптимальное по быстродействию управление, численные методы, начальное (нулевое) приближение, передаточные функции, структурные схемы, сходимость.

### ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование вычислительной и микропроцессорной техники в системах управления различными промышленными и военными объектами делает возможным реализацию практически любых законов управления, обеспечивающих высокую эффективность процессов регулирования. К таким законам относятся оптимальные законы управления, среди которых одним из важнейших является закон оптимального быстродействия [1]. В общем случае нахождение оптимального по быстродействию управления невозможно и, как правило, требует применения численных методов, при реализации которых возникает проблема обеспечения сходимости итерационного процесса. В первую очередь это относится к нелинейным объектам, которыми на практике являются все физические системы [2].

Разработка численных методов, которые позволяли бы успешно решать данную задачу для широкого класса нелинейных систем и множества решаемых ими задач, представляется весьма затруднительной, если вообще возможной. Это приводит к необходимости выявления определенных типов нелинейных объектов, для которых удастся разработать достаточно простые процедуры расчета оптимального управления. Этим объясняется значительное количество предлагаемых в литературе различных численных методов, каждый из которых обладает определенными достоинствами и недостатками.

В настоящей статье рассматриваются алгоритм нахождения оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами одного класса, построенного на основе применения метода последовательных опорных решений [3], и его программная реализация на языке программирования математического пакета *Matlab*.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА

Предлагаемый алгоритм позволяет рассчитать оптимальное по быстродействию управление объектами, которые можно характеризовать как нелинейные управляемые одномерные неосциллирующие объекты. Структурные схемы таких объектов можно представить в виде последовательного соединения линейных динамических звеньев с нулевыми и/или отрица-

тельными корнями их характеристических уравнений и элемента, имеющего нелинейную статическую характеристику (рис. 1). Именно такие объекты будем называть объектами одного класса.

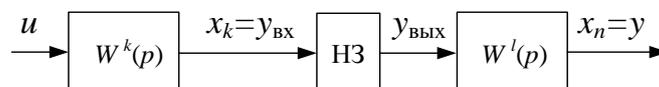


Рис. 1. Структурная схема нелинейного объекта

На рисунке имеются следующие обозначения:  $W^k(p)$ ,  $W^l(p)$  – передаточные функции линейной части объекта управления до и после нелинейного элемента, представляющие последовательное соединение линейных динамических звеньев с нулевыми и/или отрицательными корнями характеристических уравнений;  $u$  – управляющее воздействие, на которое наложено ограничение  $|u| \leq u_{\max}$ ;  $y_{\text{вх}}$ ,  $y_{\text{вых}}$  – входная и выходная координаты нелинейного звена (НЗ), связанные соотношением  $y_{\text{вых}} = \varphi(y_{\text{вх}})$ ;  $y$  – выходная координата системы;  $n = k + l$  – порядок объекта управления. На практике, как правило, порядок астатизма объекта управления не превышает второго. Будем считать, что характеристика НЗ  $\varphi(y_{\text{вх}})$  в диапазоне изменения соответствующих фазовых координат является непрерывной и монотонной функцией.

Уравнения движения рассматриваемого объекта управления можно представить в виде системы:

$$\dot{x} = f(x_1, x_2, \dots, x_n, u, \varphi) = A x + B u + D \varphi;$$

$$y_{\text{вх}} = x_k; y_{\text{вых}} = \varphi(y_{\text{вх}}) = \varphi(x_k);$$

где  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ;

$$f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T;$$

$$A = \text{diag} \left[ -\frac{a_1^1}{a_0^1}, -\frac{a_1^2}{a_0^2}, \dots, -\frac{a_1^n}{a_0^n} \right];$$

$$B = [1/a_0^1, 0, \dots, 0]^T;$$

$$D = [0, 0, \dots, 0, 1/a_0^{k+1}, 0, \dots, 0]^T;$$

$a_0^i, a_1^i$  – коэффициенты знаменателя передаточной функции  $i$ -го динамического звена:

$$W_i(p) = \frac{1}{a_0^i p + a_1^i}.$$

Причем, если  $a_1^i = 0$ , то  $i$ -е звено является интегрирующим звеном, если  $a_1^i > 0$  – аперидическим звеном первого порядка.

Для таких объектов, как известно, верхняя граница числа интервалов управления определяется условиями, аналогичными теореме об  $n$ -интервалах управляющего воздействия, т. е. для построения оптимального по быстродействию управления такими объектами необходимо не более  $n$  интервалов знакопеременного управляющего воздействия:  $u(t) = \pm u_{\max}$ , где  $n$  – порядок объекта управления [4, 5]. Данное обстоятельство существенно упрощает задачу нахождения оптимального управления, так как в этом случае вид управления становится однозначно определенным.

Кроме того, ограничимся рассмотрением для таких объектов задач перенастройки (перероентации), которые связаны с их переводом из одного установившегося состояния в другое за минимально возможное время [6]. Отличительной особенностью таких задач является значительное изменение лишь одной выходной координаты системы за время управления. Примерами таких режимов могут служить: восстановление напряжения генератора за мини-

мальное время, работа позиционного электропривода по переводу рабочего механизма в некоторые задаваемые положения и др.

Оптимальное по быстродействию управление рассматриваемым объектом определяется процедурой принципа максимума Понтрягина [7], в соответствии с которой оно принимает значение

$$u(t) = u_{\max} \operatorname{sign} \sum_{i=1}^n b_i \psi_i(t),$$

где  $b_i$  – элементы вектора  $\mathbf{B}$ ;

$\psi_i(t)$  – сопряженные переменные.

В этом случае управление кусочно-постоянно, а число интервалов постоянства знаков управления определяется числом корней функции  $\mathbf{B}^T \boldsymbol{\psi}(t)$ .

Задача определения оптимального управления (по быстродействию) нелинейными динамическими объектами специального вида, для решения которой предназначена разработанная программа, может быть сформулирована следующим образом: требуется найти управление  $(u(t))$ , переводящее рассматриваемый объект (см. рис. 1) из начального состояния  $(\mathbf{x}^0)$  в конечное  $(\mathbf{x}^k = 0)$  за  $t_{\min}$ . При этом имеется ограничение  $|u(t)| \leq u_{\max}$ .

Оптимальное управление определяется как функция времени  $u = u(t)$ .

В этом случае оптимальное управление может быть найдено решением трансцендентной алгебраической системы  $n$  уравнений относительно длительностей интервалов управления  $t_i$  одним из численных методов [3, 8]:

$$F_i(x_i^0, x_i^k, t_1, t_2, \dots, t_n, u_m \operatorname{sign} u_1) = 0, \quad (1)$$

где  $F_i$  – однозначные функции своих переменных;

$\operatorname{sign} u_1$  – знак управления на первом интервале.

Система (1) может быть получена с помощью метода припасовывания, исходя из знания структуры объекта управления и непрерывности изменения координат, а также с учетом смены знака управляющего воздействия на интервалах управления.

Для нелинейных объектов при таком подходе к определению оптимального управления приходится сталкиваться с двумя существенными трудностями:

– аналитическое получение системы уравнений (1) из-за наличия НЗ весьма проблематично, если вообще возможно;

– для решения системы (1) необходимо иметь начальное приближение  $t_{10}, t_{20}, \dots, t_{n0}$ , обеспечивающее сходимость численных методов.

Для преодоления указанных трудностей воспользуемся методом последовательных опорных решений (МПОР), в основе которого лежит представление модели сложного объекта как совокупности более простых моделей. В соответствии с основной идеей метода решение оптимизационной задачи сводится к последовательному решению этой задачи для объектов с различной степенью сложности математической модели, начиная с наиболее простой, для которой решение оптимизационной задачи не представляет сложности и, как правило, может быть получено аналитически. Решение (длительности интервалов управления), полученное для простой математической модели (опорной структуры), используется в качестве начального приближения при нахождении оптимального управления для более сложной математической модели объекта. Последовательно решая оптимизационную задачу для все более усложняемой математической модели объекта, используя при этом в качестве начального приближения полученные на предыдущем шаге результаты, искомое решение все ближе и ближе приближается к оптимальному.

Алгоритм МПОР может быть представлен как

$$\boldsymbol{\alpha}^{(k+1)} = \mathbf{S}^{(k+1)}(\boldsymbol{\alpha}^{(k)}, \boldsymbol{\Delta}^{(k)}), \quad k = 1, 2, \dots, r,$$

где  $\alpha^{(k)}$  – начальные (нулевые) приближения, полученные при выполнении  $k$ -го оператора  $S^{(k)}$ ;  $\alpha^{(k)} = \{\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, \dots, \alpha_j^{(k)}, \dots\}$ ;  
 $\Delta^{(k)}$  – недостающие приближения на  $(k+1)$ -м шаге, которые определяются исходя из свойств присоединяемых структур (обычно, динамических звеньев 1-го порядка).

Следует заметить, что представление объекта управления в виде последовательно соединенных типовых динамических звеньев может оказаться не совсем удобным для проведения математических преобразований при нахождении оптимального управления. Поэтому с целью упрощения математического описания целесообразно, воспользовавшись эквивалентным преобразованием моделей, от последовательного соединения звеньев перейти к структуре с параллельным соединением типовых динамических звеньев.

Таким образом, МПОР [3] позволяет провести целенаправленный выбор начального приближения на каждом шаге итерационного вычислительного процесса решения оптимизационной задачи для сложного динамического объекта, которое обеспечивает его сходимость.

В соответствии с идеей метода последовательных опорных решений оптимальное управление исходным нелинейным объектом определяется оператором  $r$ -го опорного решения  $S^{(r)} = S$ , в качестве начального (нулевого) приближения длительностей управления используются значения переменных, полученных для линеаризованной модели объекта управления, в которой нелинейная функция  $\varphi(y_{\text{вх}})$  представляется линейной в диапазоне изменения выходной координаты нелинейного элемента в рабочем режиме. Длительности интервалов оптимального управления для линеаризованной модели определяются в результате последовательного решения оптимизационной задачи в соответствии с методом последовательных опорных решений.

Для преодоления трудности получения системы (1) для нелинейного объекта оператор  $r$ -го опорного решения  $S^{(r)}$  сводится к процедуре, которая устанавливает функциональную зависимость  $\mathbf{Z}$  разности  $\mathbf{x}(T_k) - \mathbf{x}^k$  от вектора  $\mathbf{t}^0 = \{t_1^{(r-1)}, t_2^{(r-1)}, \dots, t_n^{(r-1)}\}$ :

$$\mathbf{x}(T_k) - \mathbf{x}^k = \mathbf{Z}(\mathbf{t}^0),$$

где  $\mathbf{Z}$  –  $n$ -мерная вектор-функция;

$$T_k - \text{длительность переходного процесса, } T_k = \sum_{i=1}^n t_i^{(r-1)}.$$

Формально, процедура сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений: требуется найти вектор  $\mathbf{t}^0$ , при котором  $\mathbf{Z}(\mathbf{t}^0) = 0$  или, что то же самое, при котором  $\mathbf{x}(T_k) = \mathbf{x}^k$ .

Таким образом, оператор  $r$ -го опорного решения  $S^{(r)} = S$  представляет собой процедуру нахождения оптимального управления для исходного нелинейного объекта.

Описанный выше алгоритм обеспечивает эффективное (с точки зрения числа итераций) решение задачи нахождения оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами одного класса.

## СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Для реализации изложенного алгоритма разработана программа, которая включает ряд блоков, обеспечивающих соответствующие шаги алгоритма (рис. 2).

Блок 1 ввода исходных данных и расчета необходимых для реализации алгоритма параметров предназначен для задания структуры объекта управления, его параметров (коэффициентов передачи, постоянных времени), вида характеристики НЗ и его места в структуре



Рис. 2. Схема построения программы

виду определяется с помощью преобразования подобия: начальные условия  $x_j^0 = S^{-1}x^0$ ; конечные условия  $x_j^k = S^{-1}x^k$ , где  $S$  – матрица преобразования.

В блоке 4 осуществляется расчет оптимального управления линеаризованным объектом управления с помощью МПОР.

В блоке 5 осуществляется расчет оптимального управления исходным нелинейным объектом управления с помощью процедуры, описание которой приведено выше.

При запуске программы открывается основное рабочее окно (рис. 3,а), которое связывает воедино функции программы. На рис. 3,б показан вид меню «Ввод исходных данных».

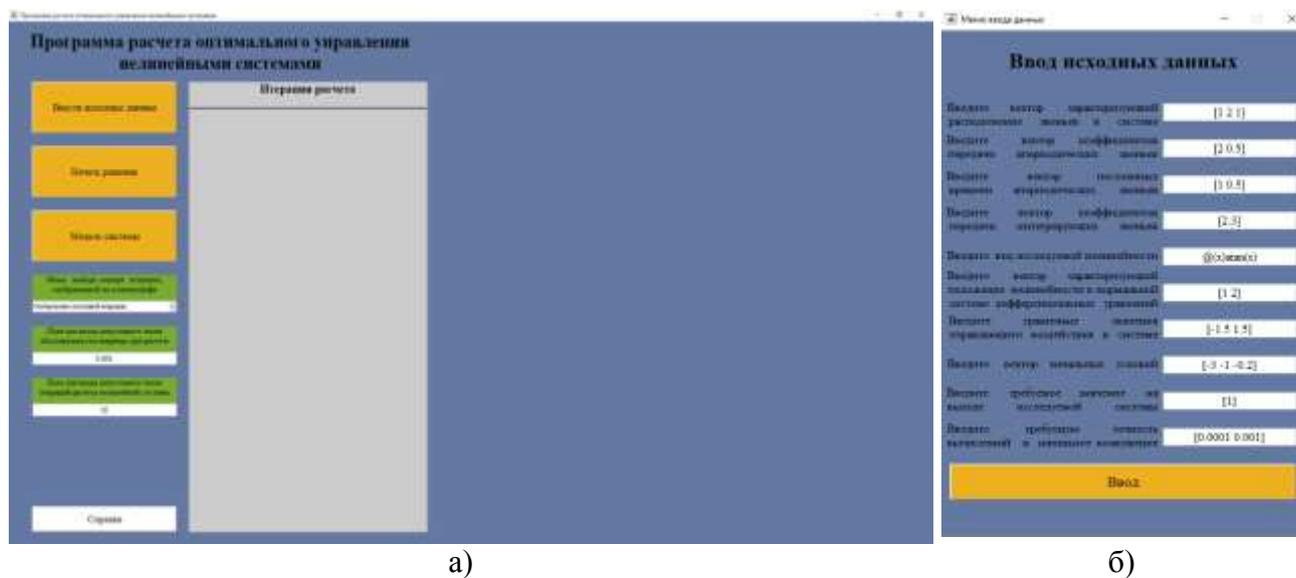


Рис. 3. Вид основного рабочего окна программы (а) и меню «Ввод исходных данных» (б)

После выполнения расчета в окне итераций появляется ход итерационного процесса с выводом интервалов знакопостоянства управляющего воздействия на каждой итерации и до-

объекта, граничных значений управляющего воздействия, начальных и конечных значений фазовых координат, требуемой точности вычислений и начального возмущения для процедуры нахождения оптимального управления для исходного нелинейного объекта. На основании исходных данных формируется в символьном виде система нелинейных дифференциальных уравнений с учетом порядка расположения звеньев и НЗ в структуре объекта.

В блоке 2 линеаризации объекта управления осуществляется линеаризация статической характеристики НЗ по методу наименьших квадратов посредством линейной функции  $g(x) = ax$ ,  $a \in R$ . Если в системе нет НЗ, то линеаризация не требуется. Осуществляется расчет для линейного объекта.

В блоке 3 осуществляется преобразование линеаризованного объекта (последовательное соединение типовых динамических звеньев) к структурной схеме с параллельным соединением звеньев.

Связь между переменными состояния исходного объекта и преобразованного к параллельному

стигнутой нормы невязок. В конце указывается количество итераций и время, затраченное на проведение всего комплекса расчетов.

Справа от окна итераций появляются графики изменения фазовых координат системы под действием управляющего воздействия. Переключение графиков производится в «меню выбора номера итерации», отображаемой на осциллографе (рис. 4).

При выборе пункта «Модель системы» открывается окно приложения *Simulink* (рис. 5), в котором автоматически строится исследуемая нелинейная система.

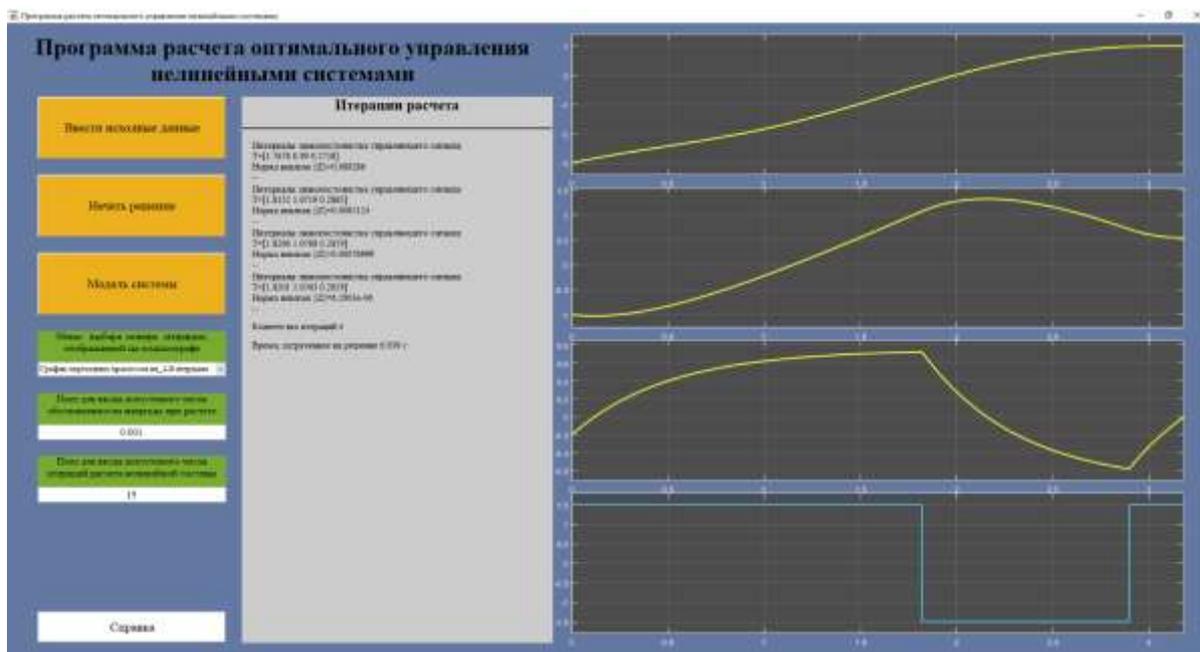


Рис. 4. Результаты расчета оптимального управления нелинейным объектом

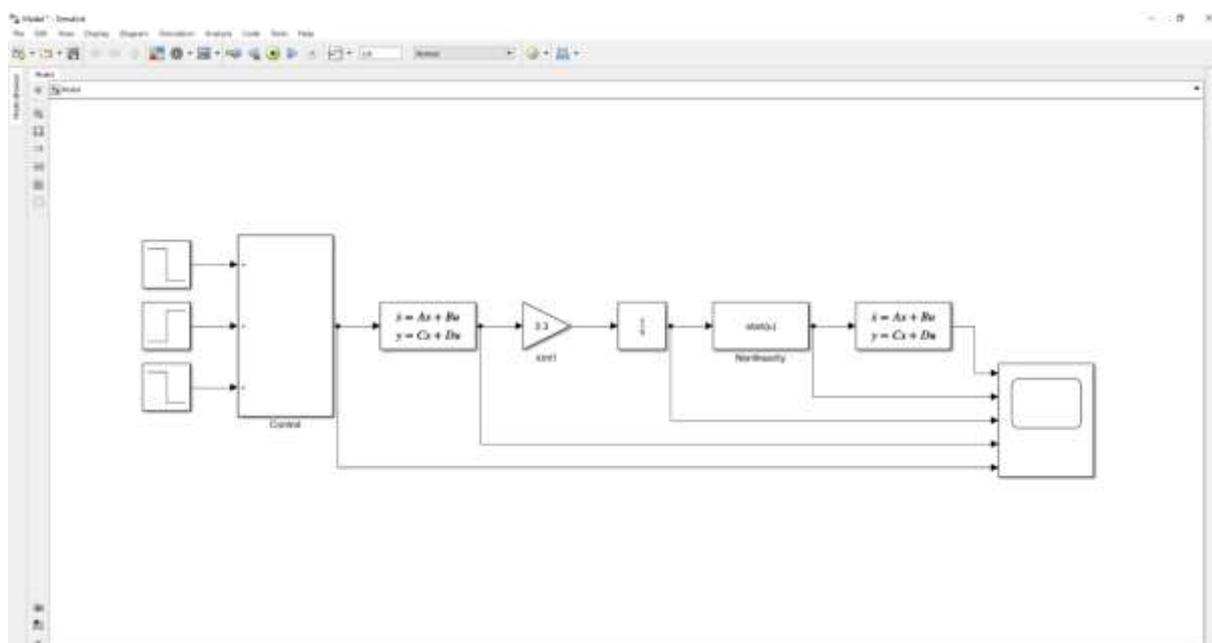


Рис. 5. Модель нелинейного объекта в Simulink

В программе предусмотрены проверка вводимых исходных данных на корректность, контроль итерационного вычислительного процесса на достижимость решения (по превышению заданного числа итераций или наличие отрицательного решения) с сообщением об ошибке.

Разработанная программа позволяет проводить решение задачи нахождения оптимального по быстродействию управления нелинейными объектами одного класса и имеет ряд несомненных достоинств:

- удобный графический интерфейс;
- легкость восприятия информации;
- наглядность процесса решения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм численного решения задачи нахождения оптимального управления нелинейными объектами, структурные схемы которых состоят из последовательно включенных монотонных нелинейностей и линейных динамических звеньев с нулевыми и отрицательными корнями характеристических уравнений, позволяет обеспечить сходимость итерационных вычислительных процедур и значительно сократить время решения. Однако он не может быть реализован в виде аналитического решения. Для обеспечения практического использования разработана его программная реализация в среде *Matlab*.

## Список используемых источников

1. Александров В. М. Вычисление оптимального управления в реальном времени // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2012. – Т. 52, № 10. – С. 1778–1800.
2. Александров В. М. Оптимальное по быстродействию управление одним классом нелинейных систем // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2004. – № 4. – URL: <http://www.neva.ru/journal> (дата обращения: 15.01.2021).
3. Карагодин В. В. Метод последовательных опорных решений в задачах оптимального быстродействия: монография. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2013. – 144 с.
4. Клюев А. С., Колесников А. А. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
5. Олейников В. А., Зотов Н. С., Пришивин А. М. Основы оптимального и экстремального управления. – М.: Высшая школа, 1969. – 296 с.
6. Карагодин В. В., Горин В. А., Смирнов С. В. Метод последовательных опорных решений и его применение для нахождения оптимального по быстродействию управления линейными неосциллирующими объектами // Пром-Инжиниринг: труды II международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 210–215.
7. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1976. – 392 с.
8. Антомонов Ю. Г. Синтез оптимальных систем. – Киев: Наукова думка, 1972. – 320 с.

В. А. Двинин,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Д. А. Кретьюк,  
*кандидат технических наук;*  
Д. В. Рыбаков,  
*кандидат технических наук*

## **СТРАТЕГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ МЕСТАХ ПОСАДКИ, ЧИСЛЕ И МОЩНОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

В работе предложена стратегия формирования структуры систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры в условиях изменения мест посадки, числа и мощности потребителей в процессе жизненного цикла специального объекта. Согласно предложенной стратегии разработана структурная схема электроснабжения, адаптирующаяся под особенности рассматриваемых объектов. Предложено описание структурной схемы электроснабжения, определены требования к ней и рекомендации к применению конкретных элементов данной структурной схемы.

Ключевые слова: отдельные технические системы, структура системы электроснабжения, технико-экономические показатели, реконструкция, жизненный цикл.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Как правило, особенностью большинства объектов военной инфраструктуры является статичность структуры системы электроснабжения (СЭС), заключающаяся в том, что количество элементов и потребителей электроснабжения на протяжении всего жизненного цикла системы не меняется. Исключением из правила являются объекты Главного испытательного космического центра (ГИКЦ) прошлого поколения, структура систем электроснабжения которых, меняется на протяжении всего жизненного цикла. Причем изменения касаются как структуры СЭС, так и потребителей специального объекта (СО).

На территории рассматриваемых объектов размещаются позиции отдельных технических систем (ОТС), таких как радиотехнические комплексы, оптические станции, центры обработки информации и связи и т. п. Примером таких объектов могут служить отдельные контрольно-измерительные комплексы (ОКИК), например, объекты ГИКЦ, базирующиеся близ Енисейска, Воркуты, Красного Села и др.

Показатели эффективности систем электроснабжения большинства объектов ГИКЦ по истечении некоторого срока эксплуатации снижаются, а именно увеличиваются затраты на передачу, преобразование и распределение электрической энергии, что ведет к ухудшению их технико-экономических свойств.

Например, СЭС технической позиции ГИКЦ, базирующиеся близ Енисейска, эксплуатируется ОАО «Оборонэнерго». Оплата услуг, число которых определяется из условий количества и мощности элементов СЭС, зависит от расчетного значения условной единицы. Согласно обследованию системы электроснабжения ОКИК в г. Енисейске, проводимого в 2013 году, техническое состояние элементов СЭС находится в неудовлетворительном состоянии, а сама структура системы электроснабжения не оптимальна. Для выполнения ОТС задач по предназначению количество элементов СЭС и их расчетная мощность завышена более чем в два раза, что влечет за собой снижение технико-экономических свойств. В результате СЭС СО не может считаться экономически эффективной.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Анализ состояния системы электроснабжения объектов военной инфраструктуры выполнен на основании отчета об обследовании системы энергоснабжения отдельного командно-измерительного комплекса, выдержка из которого представлена в [1].

Максимальная расчетная мощность технической зоны ОКИК, по эксплуатационным данным за 15–20 лет, составляет 1,5–2 МВт. Площадь технической зоны, на которой расположены ОТС, составляет 3–5 кв. км. Общее число ОТС может быть от 7 до 12–15, причем 2–3 системы могут находиться в стадии реконструкции или модернизации. Как правило, новые системы проходят наладку и опытную эксплуатацию 1–2 года, а старые системы предыдущего поколения при этом продолжают работу.

На рис. 1 приведена структурная схема СЭС, типичная для большинства ОКИК прошлого поколения.

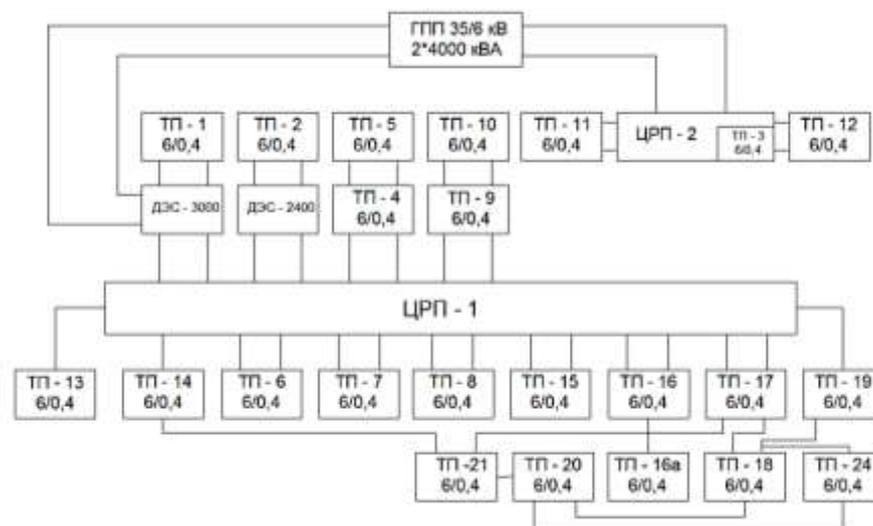


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения ОКИК

Типовым решением для СЭС существующих объектов является питание от головной понижающей подстанции (ГПП) 110/35/6 кВ по первой категории надежности. От ГПП по двум и более кабельным линиям электропередачи (КЛЭП) напряжением 6 кВ получают питание центральные распределительные пункты ЦРП-1 и ЦРП-2, расположенные на территории технической зоны. От ЦРП-1, ЦРП-2 радиальными дублированными КЛЭП питаются трансформаторные подстанции (ТП) каждой отдельной технической системы.

При максимальной зимней нагрузке 1,9 МВт (летней 0,8 МВт), установленная мощность 24 трансформаторов составляет 12 МВА. Средний зимний эксплуатационный коэффициент загрузки трансформаторов составляет 0,16 (летний 0,07) при рекомендуемых нормативных значениях 0,6–0,7. Общее число ТП составляет 15 штук, конструктивно они выполнены в кирпичной (бетонной) оболочке. Полная протяженность кабельных линий среднего напряжения составляет 20 км, при общей длине технической зоны 3 км. Главная причина такой избыточности заключается в том, что при вводе каждой новой ОТС для нее строилась новая ТП и прокладывалась новая дублированная радиальная КЛЭП от ЦРП. Перераспределение нагрузок на вводимые в эксплуатацию трансформаторные подстанции, демонтаж и утилизация старого оборудования в новых проектах не предусматривались. Для демонтажа кирпичных ТП и кабельных ЛЭП, хаотично расположенных по всей технической зоне, необходимы

большие трудовые и экономические затраты. Кроме того, такие работы связаны с опасностью повреждения элементов действующей СЭС.

Низкая загруженность трансформаторного оборудования влечет за собой увеличение потерь электрической энергии в элементах системы электроснабжения. При организации эксплуатации СЭС ОКИК на основе аутсорсинга нерациональность и избыточность, описанная выше, приводит к увеличению финансовых затрат на эксплуатацию СЭС в целом.

### **ОБОСНОВАНИЕ СТРАТЕГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ МЕСТАХ ПОСАДКИ, ЧИСЛЕ И МОЩНОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

В настоящее время на ряде объектов военной инфраструктуры предполагается радикальная реконструкция, при которой кроме использования новых ОТС, процессы обработки информации должны быть максимально унифицированы и располагаться в едином центре. Такие решения требуют полного изменения схемы электроснабжения, тем более, что оборудование СЭС данных объектов морально и технически устарело и эксплуатируется более 40 лет. Кабельные сети среднего напряжения выполнены кабелями ААБ 6(10) кВ, которые (по статистическим данным Мосэнерго) имеют до 7 повреждений на 100 км длины сети, а предполагаемый заводом изготовителем срок их службы составляет 25–30 лет. Современные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена или этиленпропиленовой резины имеют повреждаемость на порядок ниже, а срок службы до 50 лет.

Характерной особенностью рассматриваемых объектов ГИКЦ является наличие нескольких ОТС, предназначенных для обнаружения космических объектов различных типов, их сопровождения, обмена информацией с этими объектами, обработки и передачи информации на центры более высокого иерархического уровня. Как показывает опыт эксплуатации, для таких объектов периодический ввод в эксплуатацию новых ОТС характерен. Это следствие изменения параметров ОТС или появления новых космических объектов. Такие особенности обуславливают изменение структуры системы электроснабжения рассматриваемых специальных объектов.

Необходимо отметить, что структура системы электроснабжения формируется в процессе создания (проектирования) объекта военной инфраструктуры. При создании СЭС руководствуются требованиями, предъявляемым к ее эксплуатационным свойствам: общим (надежность и технико-экономические свойства) и специальным (технологические, энергетические и т. д.) [2].

Выбор структуры СЭС основывается на результатах решения оптимизационной задачи. Критериями оптимизации могут являться комплексные и частные показатели качества объекта [2, 3]. Результатом решения задачи должны стать принятая стратегия формирования структуры системы электроснабжения и исходные данные для создания оптимальной структуры системы электроснабжения объекта военной инфраструктуры.

При формировании пакета исходных данных для проектирования СЭС, как правило, учитывается возможное развитие (увеличение числа потребителей электрической энергии), что отражается в виде резервирования электрической мощности и мест присоединения дополнительных потребителей электрической энергии. Кроме того, задается ограничение, по которому структура СЭС является статичной, т. е. значительно не меняется на протяжении всего срока эксплуатации специального объекта. Другими словами, количество ОТС, входящих в состав СО, и их места посадки не изменены. Однако для рассматриваемых объектов военной инфраструктуры это не характерно.

Со временем каждая ОТС будет заменена на другую техническую систему. Эта ОТС нового поколения имеет свои параметры по энергопотреблению, но в то же время использует

действующие инженерные сети и интегрируется в существующую структуру СЭС специального объекта. При включении новой ОТС в структуру объекта меняются параметры потребителей, линии электропередачи, загруженность источников энергии. В процессе реконструкции учитываются требования к качеству объекта (живучесть, надежность, безопасность, экономичность и т. п.) [4], однако эксплуатационные свойства системы электрообеспечения снижаются. При их численной оценке по единичному показателю новая структура СЭС с большой долей вероятности будет менее эффективна, чем предыдущая. Такое заключение можно сделать на основании работы, проделанной в процессе обследования систем энергоснабжения ряда объектов военной инфраструктуры. Это закономерно, так как при формировании структуры СЭС при проектировании решается оптимизационная задача. По факту меняются места посадки и мощность потребителей, а элементы СЭС (распределительные устройства, трансформаторные подстанции, линии электропередачи) остаются на существующих местах.

Таким образом для рассматриваемых объектов военной инфраструктуры характерны следующие особенности:

- при вводе в эксплуатацию новых ОТС потребляемая мощность технической позиции в целом уменьшается;
- в процессе эксплуатации СО каждая ОТС будет заменена на другую техническую систему нового поколения;
- структура объектов военной инфраструктуры меняется.

Предлагаемая структурная схема СЭС объекта военной инфраструктуры при изменяющихся местах посадки, числе и мощности потребителей (рис. 2) сохраняет ЦРП объекта и линии электропередачи от ГПП энергосистемы. ЦРП должно быть оснащено современным оборудованием на основе вакуумных или элегазовых аппаратов, и иметь возможность подключения автономного источника на полную мощность объекта. Отечественная промышленность выпускает электростанции с агрегатами мощностью до 2 МВт. ЦРП и автономная электростанция должны располагаться на охраняемой территории технической позиции.

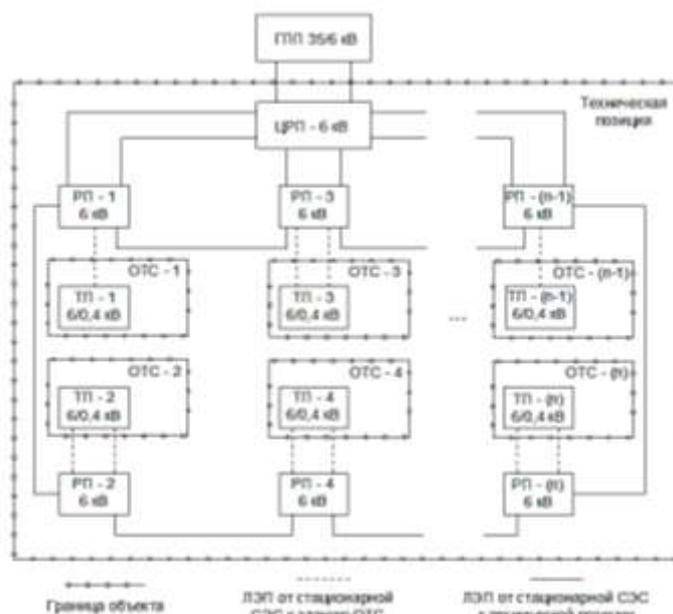


Рис. 2. Предлагаемая структурная схема системы электроснабжения объекта военной инфраструктуры при изменяющихся местах посадки, числе и мощности потребителей

Для обеспечения гибкости и возможности оперативного подключения новых потребителей предлагается разделить сеть среднего напряжения на базовую и распределительную электрические сети. Для базовой сети предлагается использовать схему дублированной магистрали (на рис. 2 – распределительные пункты РП-1 – РП-(n) и кабельные линии электропередачи между ними), которая широко используется в городских сетях Санкт-Петербурга и Москвы. В московских сетевых организациях данная схема получила название двухлучевой. По предлагаемой схеме получает питание Дворец Конгрессов (Константиновский дворец), комплекс Москва-Сити, а также большинство двухтрансформаторных подстанций в современных районах города. Двухлучевая схема построения СЭС показала высокую степень надежности в процессе эксплуатации. Каждая магистраль (луч) выполняется кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена, рассчитанным на полную мощность объекта. При мощностях 1,5–2 МВт сечение токоведущей жилы будет не более 95–120 мм<sup>2</sup>.

Для ОКИК при протяженности территории 2–3 км, потребуется 1–2 распределительных пункта на каждой магистрали. Предлагается в состав РП включить две секции сборных шин, к каждой из которых подключены по четыре выключателя нагрузки. Два используются для транзита линии, а два для подключения двух ТП в распределительной электрической сети. При необходимости дублированная магистраль может быть преобразована в кольцевую. Для этого между секциями в распределительном пункте или несколькими РП могут быть организованы поперечные связи.

В качестве распределительной электрической сети возможно использование понизительных трансформаторных подстанций и высоковольтных линий электропередачи, связывающих их с базовой электрической сетью. Одним из возможных технических решений является использование кабеля 10 кВ типа АПвПгТ(п). Данный кабель допускается прокладывать как в земле, так и в воздухе и даже в воде. По европейским нормам он безопасен при прикосновении и допускает прокладку по деревьям без вырубki просеки (в заповедниках). Наличие кабеля такого типа в ремонтном комплекте (складском резерве) может обеспечить оперативную замену поврежденного участка.

Для питания каждой ОТС, или группы ОТС, предполагается установка тупиковых двухтрансформаторных подстанций контейнерного исполнения с сухими трансформаторами. Такие ТП выпускаются отечественной промышленностью при мощности трансформаторов до 1,2 МВА. Подключение ТП выполняется по дублированной радиальной схеме. ТП целесообразно максимально приближать к местам наибольшего потребления электрической энергии. Схема каждой ТП в распределительной электрической сети должна предусмотреть возможность подключения резервного источника на стороне низшего напряжения и соответствующие блокировки. Предлагаемая структурная схема является трансформируемой, т. е. позволяет в процессе эксплуатации произвести изменение схемы электроснабжения ОТС без существенных технико-экономических затрат.

Необходимо отметить, что базовая электрическая сеть создается на весь период эксплуатации объекта, она позволяет оперативно подключать новые ТП, обеспечивающие электрической энергией вводимые в эксплуатацию отдельные технические системы. Так как базовая сеть состоит из большого числа участков, существенно упрощается поиск неисправностей. При необходимости, один или несколько участков базовой сети возможно заменить и установить дополнительные распределительные пункты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стратегия формирования структуры системы электроснабжения обеспечивает простоту подключения новых потребителей. Полная заводская готовность оборудования определяет высокое качество и минимальные сроки строительства и ввода в эксплуатацию новых ОТС. Важным достоинством предлагаемого решения является простота монтажа и демонтажа рас-

пределительных электрических сетей, а также возможность дальнейшего их использования или утилизации.

Некоторые объекты, например, полигоны по испытанию боевых средств, имеют линейные размеры 10–15 км и требования по возможности подключения в разных, подчас меняющихся точках. В этих случаях рассмотренный принцип организации сети также может быть эффективно применен при условии использования напряжения 20 кВ. Габариты оборудования на 20 кВ не отличаются от аппаратов на 6(10) кВ.

### Список используемых источников

1. *Кретюк Д. А.* Подходы к формированию структуры СЭС типового ОКИК // Материалы конференции по итогам работы военно-научного общества курсантов факультета инженерного и электромеханического обеспечения / под общ. ред. Д.А. Кретюка. – Электрон. текстовые дан. (8 Мб). – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. *Ерошенко Г. П., Кондратьева Н. П.* Эксплуатация электрооборудования: учебник. – М., 2014. – 363 с.
3. *Сикорский А. Е.* Системы электроснабжения объектов ПВО и автоматизация. Обеспечение эксплуатационной надежности и живучести систем электроснабжения: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Пушкинского военного училища радиоэлектроники, 1996. – 320 с.
4. *Зубарев А. В., Кретюк Д. А.* Подход к технико-экономическому обоснованию реконструкции системы электроснабжения обособленного объекта при уменьшении объемов энергопотребления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 9. – С. 471–478.

А. В. Зубарев,  
*кандидат военных наук;*  
Д.Н.Прищепа,  
*кандидат технических наук*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

Представлено обоснование необходимости исследования вопроса выбора способов диагностики кабельных линий, исследован вопрос представления физических процессов, протекающих в кабельных линиях с изоляцией из сшитого полиэтилена в виде математических моделей для дальнейшей оптимизации эксплуатации кабельных линий.

Ключевые слова: линии электропередач, сшитый полиэтилен, метод контроля, комплексный мониторинг, частичные разряды.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Роль электроэнергии в жизни нашего общества и в обеспечении обороноспособности страны велика и многократна. Электроэнергетика является стержневой, ведущей отраслью народного хозяйства, основной научно-технического прогресса, повышения производительности труда. Она непосредственно влияет на уровень военно-экономического потенциала страны.

В Вооруженных Силах системы электроснабжения все больше становятся составной частью вооружения. Это приводит к увеличению энерговооруженности и энергоемкости объектов и повышению требований к системам их электроснабжения в части бесперебойности питания. Можно сказать, что при отсутствии электроснабжения современные объекты МО РФ практически не способны сохранить боеготовность. Это накладывает особый отпечаток на требования к электроснабжению и принципам построения.

Для военных объектов, с точки зрения демаскирующих признаков, актуальной задачей является прокладка кабельных линий (КЛ) в системах электроснабжения. Данные линии эксплуатируются в сложных условиях, к которым относятся:

- высокие напряжения;
- большие мощности;
- высокие и низкие температуры окружающей среды;
- высокая влажность и т. д.

В этих условиях высокие требования предъявляются к свойствам кабелей, что в свою очередь ограничивает круг их применения. Следовательно необходимо применение кабелей с новыми изоляционными материалами. 85 % всех аварий на линиях происходят из-за разрушения (старения) изоляции и, как результат, их пробоя.

В настоящее время мировая практика показывает, что применение в распределительных сетях кабелей с теплостойкой изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), вместо кабелей с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ), повышает срок службы и надежность распределительных сетей.

Но одного применения в КЛ кабелей с высокими техническими параметрами недостаточно. Высокой надежности КЛ можно добиться только при правильном монтаже и эксплуатации кабелей. На кабелях с СПЭ-изоляцией не рекомендуется проведение периодических испытаний высоким напряжением промышленной частоты, а заводы-изготовители рекоменду-

ют проводить испытания высоким напряжением сверх низкой частоты (примерно 0,1 Гц), но и эти мероприятия не обеспечат безаварийную работу КЛ.

Для повышения надежности работы КЛ необходим постоянный контроль технических параметров кабелей в режиме реального времени. Это возможно лишь при применении системы непрерывного мониторинга параметров КЛ. Для таких систем необходим математический аппарат, на основе которого будет построен алгоритм их работы.

## ВЫБОР МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В настоящее время существует огромное разнообразие методов мониторинга состояния КЛ, строящихся на различных принципах измерения параметров, как изоляции, так и всей кабельной линии в целом.

О качественном состоянии изоляции можно судить по тангенсу угла диэлектрических потерь, по возвратному напряжению и току (метод поляризации), по рефлектометрии, но наличие помех и отсутствие возможности проводить измерения под рабочим напряжением делают данные методы не эффективными либо невозможными.

Методы поляризации, измерение тангенса угла диэлектрических потерь и тепловизионный контроль требуют большого времени нахождения на объекте исследования. Кроме того, тепловизионный контроль не позволяет проводить измерения скрытых частей КЛ, проложенных в земле.

По динамике изменения частичных разрядов (ЧР) можно судить о наличии неоднородностей и опасных дефектов изоляции, а также диагностировать на ранних стадиях разрушение изоляции.

Контроль температуры кабеля позволяет в режиме реального времени вести мониторинг температуры жилы как на отдельных участках, так и на всем протяжении КЛ, которая зависит от тока и практически не зависит от частоты. Сравнительный анализ методов диагностики представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Анализ неразрушающих методов диагностики КЛ

Метод диагностики	Влияние помех и паразитных токов	Необходимость многократных измерений в цикле	Информативность полученных результатов	Нормирование диагностических параметров для КЛ с СПЭ-изоляцией (значения воздействующих величин, методика, периодичность)		
				РД 34.45-51.300-97 и СТО 34.01-23.1-001-2017	Рекомендации заводов-изготовителей	Зарубежные нормативы
Измерение характеристик ЧР	•	•	•		•	•
Измерение температуры КЛ		•	•	•	•	•
Измерение tgδ	•	•	•	•	•	
Измерение напряжения, тока процессов поляризации и деполяризации диэлектрика	•	•			•	
Тепловизионный контроль			•	•		
Рефлектометрия	•				•	

Таблица 2

**Характеристики неразрушающих методов диагностики КЛ**

Метод диагностики	Возможность диагностики под нагрузкой	Характер оценки		Длительность диагностического цикла*		
		Возможность локализации дефекта	Интегральная	до 1 ч	от 1 до 2 ч	2 ч и более
Измерение характеристик ЧР	•	•		•		
Измерение температуры КЛ	•	•		•		
Измерение tgδ			•		•	
Измерение напряжения, тока процессов поляризации и депольаризации диэлектрика			•			•
Тепловизионный контроль	•		•	•		
Рефлектометрия			•		•	

\* без учета времени, затраченного на выписку наряда-допуска, проведение инструктажей.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным методом определения состояния КЛ с изоляцией из СПЭ являются методы измерения ЧР и мониторинга температуры. Частичный разряд, как и перегрев, свидетельствует о наличии дефектов в изоляции, способных предупредить о возможной аварии на линии в скором времени. Главным достоинством выбранных методов являются предупреждения о надвигающейся угрозе выхода из строя линии электропередачи, локализации развивающегося дефекта и диагностики состояния изоляции КЛ в динамике. Разложение сигналов ЧР и мест превышения температуры взаимно дополняют друг друга, дают возможность фильтрации различных помех и вести мониторинг под номинальным напряжением. Все эти методы, применяемые вместе с контролем изоляции кабеля, на сегодняшний день дают высокий эффект по мониторингу КЛЭП.

Для реализации системы непрерывного мониторинга КЛ требуется:

- разработать математическое описание физических процессов, протекающих в кабеле;
- составить алгоритм для программной части.

Это позволит создать относительно просто и недорого, с применением доступных приборов и компонентов устройство комплексного мониторинга достаточно высокого технологического уровня.

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ**

Пропускная способность – один из основных показателей кабельной линии, определяемый тепловым режимом. Срок службы КЛ определяется материалом изоляции, которая сильно зависит от температуры, тока, влажности. Изоляция КЛ с СПЭ-изоляцией обладает хорошими теплопроводящими свойствами. Вследствие чего их пропускная способность и надежность линии в целом сильно зависят от условий, в которых она работает.

Модель термофлуктуационных процессов строится на основе мониторинга температуры в объеме изоляции. В соответствии с физическими процессами термофлуктуационной теории

[2] распад конструкции происходит из-за разрушения химических связей, вследствие воздействия энергии колебания атомов и воздействия внешних сил.

Системы контроля температуры на основе оптоволокна, установленного в объеме изоляции КЛ, контролируют температурные параметры и выявляют локальные места с высокой температурой. Для термофлуктуационного мониторинга состояния КЛ в данной работе применяется более простой способ – точечное размещение датчиков в особо ответственных участках КЛ (соединительные муфты, пучки и места перекрестной прокладки кабелей, переходы через строительные конструкции, сближения с другими коммуникациями, наиболее сложные участки по условиям прокладки, линии питания ответственных потребителей и т. п.).

При появлении разрядов в изоляции кабеля происходят диэлектрические потери и локальный нагрев, энергия, рассеиваемая в изоляции, уходит на разрушение изоляции. И наоборот, на участках, где повышена температура, происходят разряды в малом объеме изоляции, следовательно необходимо вести мониторинг температуры.

Схема замещения кабеля представлена на рис. 1, где использованы следующие обозначения:  $\theta_{ж}$ ,  $\theta_{э}$ ,  $\theta_{о.и.}$ ,  $\theta_{з.о.}$ ,  $\theta_{о.с.}$  – температурные показатели элементов конструкции кабеля;  $C$  – способность поглощать тепло;  $R_{ж}$ ,  $R_{э}$ ,  $R_{о.и.}$ ,  $R_{з.о.}$  – теплопередача;  $Q_{ж}$ ,  $Q_{о.и.}$  – температура.

Температура в объеме изоляции рассчитывается по уравнениям теплопроводности:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{о.с.} + \left( \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right) / 2\pi r h, (h = h_{о.с.}) \\ \theta(h_{о.с.}) + \ln \left( \frac{r_{о.с.}}{h} \right) \left( \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right) / 2\pi \lambda_{о.с.}, (h_{з.о.} \leq h \leq h_{о.с.}) \\ \theta(h_{з.о.}) + \ln \left( \frac{r_{з.о.}}{h} \right) \left( \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right) / 2\pi \lambda_{о.и.}, (h_{э} \leq h \leq h_{з.о.}) \\ \theta(h_{э}) + \ln \left( \frac{h_{э}}{h} \right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} - \frac{\delta_{э}^2}{\gamma_{э}} h_{о.и.}^2 \pi}{2\pi \lambda_{э}} + \frac{I_{э}^2 (h_{э}^2 - h^2)}{4\lambda_{э}}, (h_{о.и.} \leq h \leq h_{э}) \\ \theta(h_{о.и.}) + \ln \left( \frac{h_{о.и.}}{h} \right) \frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} / 2\pi \lambda_{о.и.}, (h_{ж} \leq h \leq h_{о.и.}) \\ \theta(h_{ж}) + \delta_{ж}^2 (h_{ж}^2 - h^2) / 4\lambda_{ж} \gamma_{ж}, (0 \leq h \leq h_{ж}) \end{cases} \quad (1)$$

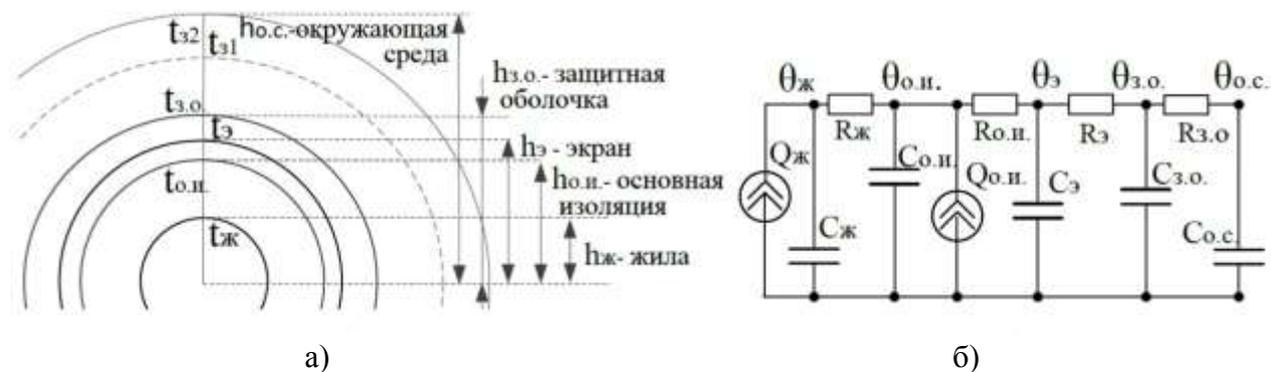


Рис. 1. Схема замещения кабеля:

а – сечение кабеля; б – эквивалентная тепловая схема замещения

После преобразования формула принимает вид:

$$\theta_{\text{ж}}(t) = \theta_{\text{з.о.}}(t) + \frac{n * I^2 * \rho_{20} * m * T_K * K_P [1 + \alpha(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{о.с.}}(t))]}{S}, \quad (2)$$

- где  $\theta_{\text{ж}}$  – расчетная температура жилы кабеля, °C;  
 $\theta_{\text{з.о.}}$  – измеренная температура поверхности кабеля (защитной оболочки) в месте установки датчика температуры, °C;  
 $n$  – число жил кабеля;  
 $I$  – максимальный ток кабеля при проведении измерений, А;  
 $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление жилы кабеля при 20 °C, Ом·м;  
 $T_K$  – сумма термических сопротивлений изоляции и защитных покровов кабеля, °C;  
 $m$  – экспериментальный множитель;  
 $K_P$  – поправочный коэффициент для приведения электрического сопротивления к расчетной температуре,  $K_P = 1,02$ ;  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала жилы (приведен пример для алюминия),  $\alpha = 0,0043081$  °C;  
 $\theta_{\text{доп}}$  – длительно допустимая температура жилы,  $\theta_{\text{доп}} = 90$  °C;  
 $\theta_{\text{о.с.}}$  – измеренная температура окружающей среды, °C;  
 $S$  – сечение жилы кабеля, м<sup>2</sup>.

Учитывая все коэффициенты и константы формулу можно еще упростить и свести к зависимости вида:

$$\theta_{\text{ж}}(t) = \theta_{\text{з.о.}}(t) + I^2 \cdot (k + k_1 \cdot \theta_{\text{о.с.}}(t)), \quad (3)$$

где  $k$  и  $k_1$  – коэффициенты, зависящие от геометрических размеров и материала кабеля, которые можно однозначно определить, зная его тип.

При изготовлении изоляции высоковольтного оборудования принимаются специальные меры против появления газовых включений. Несмотря на это приходится считаться с возможностью их случайного образования как на стадии изготовления (например, из-за несовершенства процессов сушки и пропитки), так и в процессе эксплуатации (вследствие появления трещин при механических перегрузках или выделения газов при разложении материалов из-за местных перегревов).

С учетом вышеизложенного схема замещения реального диэлектрика может быть представлена тремя параллельными ветвями. Емкость  $C_X$  называется «безинерционной» и состоит из суммы емкости вакуумного конденсатора, имеющего аналогичные электроды, и емкости, определяемой процессами быстрых видов поляризации (безинерционных). Емкость  $C_B$  определяется процессами медленной (или релаксационной) поляризации. При этом

$$C_X = C_D + \frac{C_B \cdot C_T}{C_B + C_T}. \quad (4)$$

Так как диэлектрическая проницаемость диэлектрика значительно выше диэлектрической проницаемости газа ( $\epsilon_{\text{воздуха}} = 1$ ), напряженность электрического поля в газовом включении превышает напряженность поля в основном диэлектрике (рис. 2). На эквивалентной схеме (рис. 3) показано, что  $C_B$  и  $C_T$  образуют емкостной делитель напряжения. При приложении напряжения сети  $U_{\text{сети}}$  к такому делителю напряжения на газовом включении  $U_B$  будет равно:

$$U_B = \frac{C_T}{C_T + C_B} U_{\text{сети}}. \quad (5)$$

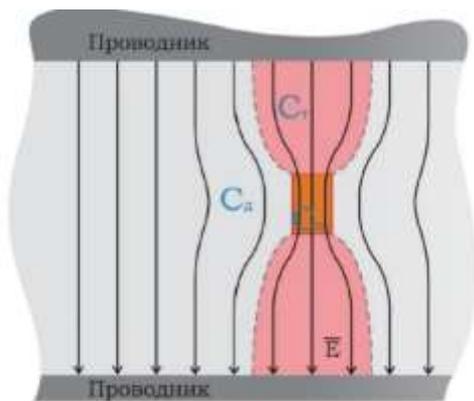


Рис. 2. Распределение силовых линий электрического поля в изоляции

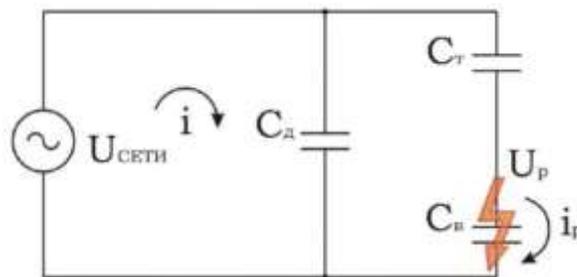


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения изоляции с газовыми включениями

Приняв, что площади обкладок емкостей  $C_B$  и  $C_T$  равны ( $SC_B = SC_T$ ), а диэлектрическая проницаемость газа во включении равна 1, получаем:

$$U_B = \frac{1}{1 + \frac{C_B}{C_T}} U_{\text{СЕТИ}} = \frac{U_{\text{СЕТИ}}}{1 + \frac{d_T}{d_B \varepsilon_T}}, \quad (6)$$

где  $d_T$  – толщина твердого диэлектрика (СПЭ);

$d_B$  – толщина газового включения.

Как следует из приведенных соотношений, диэлектрические потери зависят не только от свойств диэлектрика и частоты приложенного к нему напряжения, но и от объема изоляции:

$$U_P = U_{\text{н.и.}} \left( \frac{d_T/d_B}{\varepsilon_T} + 1 \right), \quad (7)$$

где  $\varepsilon_T$  – диэлектрическая проницаемость изоляции из СПЭ,  $\varepsilon_T = 2,3$ .

Учитывая известный параметр, получаем

$$U_P = U_{\text{н.и.}} \left( \frac{d_T}{2,3 \cdot d_B} \right). \quad (8)$$

Если величина напряжения на газовом включении превысит предельное значение, то действующее значение напряжения [кВ (эффективных)] на всем изоляционном промежутке составит

$$U_{\Pi} = (0,1 \div 0,9) U_P. \quad (9)$$

Критические ЧР могут продолжаться и после снижения напряжения до величины номинального. Разрушение изоляции продолжится при рабочем напряжении, что приведет к быстрому повреждению оборудования. Поэтому возникновение критических ЧР не должно допускаться даже при кратковременном повышении напряжения, которое измеряется в кулонах и вычисляется по формуле

$$q_{\text{ЧР}} = \Delta U \cdot C_X. \quad (10)$$

Моделирование физических процессов позволяет разработать практические методы определения параметра  $q_{\text{ЧР}}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ методов диагностики кабельных линий показал, что для кабелей с СПЭ изоляцией наиболее оптимальным будет использование в процессе эксплуатации методов измерения ЧР и мониторинга температуры кабелей.

Данные математические модели определения температуры жилы кабеля и величины ЧР обладают меньшей вычислительной сложностью, по сравнению с применяемыми моделями при проектировании и создании систем непрерывной диагностики КЛ. Вместе с тем, одной из проблем остается отделение ЧР от помех.

По результатам исследований физических процессов, протекающих в кабельных линиях, можно сделать вывод о необходимости использования формул (3) и (10) для определения действительной температуры жилы кабеля и в дальнейшем сравнении ее с допустимой, а также определения величины частотного разряда. Данные выражения возможно использовать для создания программных продуктов, реализуемых в устройствах мониторинга кабельных линий.

Контроль физических процессов, протекающих в кабельных линиях, позволит:

- в режиме реального времени получать данные о физическом состоянии кабельных линий и оперативно реагировать на их изменения;
- на основе представленных математических моделей создать алгоритм мониторинга КЛ с изоляцией на основе СПЭ для объектов, требующих определенную категорию надежности;
- обосновать оптимальную структуру системы эксплуатации кабельных линий с СПЭ изоляцией.

## Список используемых источников

1. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / М. Ю. Охтилев [и др.] // Информационные технологии. – 2011. – № 10. – С. 14–20.
2. Модель измерительной информации в системах мониторинга космических средств / В. А. Каргин [и др.] // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 1. – С. 39–43.
3. М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, Пшихонов В. Х. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3(90). – С. 117–127.
4. Обобщенная модель измерительной информации в системах телеметрии реального времени / В. А. Каргин [и др.] // Труды Международной научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях». АИТА-2011. Москва, 4–8 апреля 2011 г. – М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2011. – С. 781–789.
5. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном времени / В. А. Каргин [и др.] // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 77–82.
6. Тихонов В. И., Хименко В. И. Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения // Радиотехника и электроника. – 1998. – № 5. – С. 501–523.
7. Тихонов В. И., Хименко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987. – 305 с.

А. В. Зубарев,  
*кандидат военных наук;*  
Д. Н. Прищепа,  
*кандидат технических наук*

## **МЕХАНИЗМЫ ВЫБОРА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

В статье рассмотрен процесс выбора значений параметров технического обслуживания элементов системы электроснабжения объектов военной инфраструктуры, представлены математические модели выбора оптимальных значений множества параметров технического обслуживания элементов системы электроснабжения.

Ключевые слова: система электроснабжения, техническое состояние, эксплуатационные затраты, техническое обслуживание.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований в области управления процессом эксплуатации показывают, что эффективным средством повышения целевых возможностей объектов военной инфраструктуры является применение стратегий «гибкого реагирования» на техническое состояние элементов технических систем. В этом случае учитывается реальное техническое состояние элементов технических систем. Базируются эти стратегии на учете информации о фактическом техническом состоянии (ТС) обслуживаемых элементов при назначении определенных сроков проведения технического обслуживания и его объемов. Элементы стратегий гибкого реагирования, а именно стратегии проведения технического обслуживания с неопределенной периодичностью уже внедрены в практику эксплуатации средств связи и передачи информации на объектах МО РФ.

Применение постоянной комплексной диагностики в режиме реального времени в соответствии с полученными и прогнозируемыми результатами может дать существенный технико-экономический эффект, что позволит повысить готовность средств и значительно (в 1,5–2,5 раза) снизить эксплуатационные затраты. Поэтому в научной среде, которая изучает вопросы повышения эффективности эксплуатации, возникают актуальные задачи, связанные с теоретическим обоснованием и практической реализацией при внедрении гибких стратегий в процесс эксплуатации. В том числе это актуально и при рассмотрении вопросов повышения эффективности систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры.

Применение стратегий «гибкого реагирования» в полном объеме при эксплуатации СЭС объектов военной инфраструктуры на данный момент невозможно. Связано это с достаточно большим количеством типоразмеров элементной базы СЭС объектов, а также с одновременным наличием устаревшего оборудования, реконструируемого и нового, вводимого в эксплуатацию. При реконструкции и вводе нового оборудования элементы СЭС, как правило, уже имеют элементы диагностики. Для устаревшего оборудования это иногда технически невозможно или экономически нецелесообразно. Поэтому для создания механизмов, позволяющих найти оптимальные параметры ТО элементов СЭС с учетом реализации в них стратегии «гибкого реагирования», необходимо решить ряд математических задач с несколькими определяющими условиями.

Актуальность задачи выбора оптимального набора параметров ТО элементов СЭС обусловлена еще и тем, что при организации процесса эксплуатации каждого элемента СЭС

необходимо учитывать и оптимальные для каждого элемента сроки и объемы обслуживания, и данные системы мониторинга, и имеющиеся ресурсы и интересы по выполнению непосредственно задач объекта. Решение данной задачи усложняется еще и особенностями, о которых говорилось ранее. К таким особенностям относятся:

– многофункциональность, разнотипность (по виду элементной базы), эксплуатационные свойства, варианты исполнения (в ряде объектов МО РФ насчитывается более 1500 типоразмеров элементов СЭС);

– прямая взаимосвязь потребителей и элементов СЭС в процессе работы объекта;

– высокие требования к эксплуатационно-техническим характеристикам каждого элемента и системы в целом, высокие требования по обеспечению надежности электроснабжения;

– значительная разность во времени при вводе в эксплуатацию элементов системы электроснабжения, а также одновременное наличие современного и морально устаревшего оборудования, аппаратуры с просроченными ресурсами;

– неполный охват системой автоматической диагностики всех элементов СЭС, а также сложные зависимости изменения параметров надежности элементов СЭС в зависимости от наработки.

Кроме того, в условиях необходимого энергосбережения и возможности применения энергоэффективных технологий перспективные пути и способы совершенствования системы технической эксплуатации СЭС должны быть тесно связаны с экономическими аспектами создания и функционирования СЭС. Это означает, что решение задачи определения значений параметров ТО элементов СЭС необходимо рассматривать в контексте разработки ресурсосберегающих методов и технологий создания и эксплуатации сложных систем.

Таким образом, при определении значений параметров ТО элементов СЭС объекта требуется привлечение аппарата системных исследований с одновременным анализом эксплуатации СЭС в условиях ресурсных (экономических) ограничений.

## **ВАРИАНТ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЭС**

При постановке задачи нахождения оптимальных значений параметров ТО элементов СЭС эффективность СЭС всего объекта не может быть оценена каким-то одним из показателей функционирования системы. Определим, что «в качестве показателя эффективности функционирования СЭС при исследовании задачи выбора оптимальных значений ТО элементов будем использовать вектор» [1]:

$$\langle V_{i1}, V_{i2} \rangle = \langle Q_{i1}, Q_{i2} \rangle, \quad (1)$$

где  $V_{i1}$  – массив показателей, характеризующих состояние и готовность элементов СЭС;

$V_{i2}$  – массив показателей, определяющих состояние элементов СЭС;

$Q_{i1}$  – массив элементов СЭС, которые должны быть исправны и работоспособны для выполнения объектом определенной задачи;

$Q_{i2}$  – массив показателей, определяющих затраты ресурсов на поддержание минимального набора элементов СЭС, которые должны быть исправны и работоспособны.

При такой постановке задачи показатели, которые относятся и к отдельным элементам и к системе электроснабжения в целом, не дают четкого представления об эффективности проведения ТО и влияния его на показатели системы. Также процесс принятия решения затрудняется большими массивами информации и отсутствием четких критериев, определяющих конечный результат. Поэтому решение задачи требует введения четко сформулированных и

формализованных условий и ограничений, которые будут коррелировать с целью поставленного выбора и определять желаемый результат.

В данном случае условия, определяющие многокритериальную задачу нахождения оптимальных параметров ТО элементов СЭС, будут выглядеть следующим образом: техническое обслуживание элементов СЭС объектов военной инфраструктуры должно быть организовано таким образом, чтобы показатели функционирования эксплуатируемой СЭС (показатели качества электроэнергии, интенсивность отказов, интенсивность восстановления, время перерыва в электроснабжении, вероятность безотказной работы) стремились к наилучшим значениям. То есть необходимо обеспечить максимальное значение показателей готовности элементов и их работу в течение определенного времени, а также функционирование подсистем СЭС и системы в целом, при этом затраты на техническое обслуживание должны быть минимизированы. В этом случае запись постановки задачи будет иметь вид

$$\begin{aligned} V_{i1} &\rightarrow \max \\ V_{i2} &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (2)$$

Частые показатели должны сохранять значения не ниже предъявляемых к самой системе, т. е. такое условие можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_{уд}(x) &\leq Z_{уд}^{Tr} \\ K_{Г}(x) &\leq K_{Г}^{Tr} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Z_{уд}(x)$  – средние удельные затраты на выполнение мероприятий по ТО;  
 $K_{Г}(x)$  – коэффициент готовности, эксплуатируемой СЭС;  
 $Z_{уд}^{Tr}, K_{Г}^{Tr}$  – требуемые значения соответствующих показателей.

В научных статьях [2, 3], посвященных применению гибких стратегий при эксплуатации различных по функционалу технических систем, описан алгоритм поиска оптимального состава системы технической эксплуатации. В данной работе предлагается, используя основные блоки этого алгоритма, создать механизм для оптимизации показателей ТО элементов СЭС. В такой формулировке представленный ниже алгоритм будет решать задачу минимизации ресурсов на ТО элементов СЭС при сохранении показателей готовности СЭС к функционированию.

1. Задание вектора управляемых параметров. Вопрос определения параметров технического обслуживания элементов СЭС объекта, как отмечалось при постановке задачи, может быть сведен к решению задачи определения перечня операций для каждого элемента в зависимости от его состояния по данным системы мониторинга или статистическим данным.

2. Определение полного перечня показателей, определяющих состояние эксплуатируемой СЭС.

3. Определение целевых функций и ограничений при формировании множества значений параметров ТО элементов СЭС. При этом определяются выражения (2) и (3). Данный этап заключается в определении выражений (2) и (3) с учетом требований по эффективности технического обслуживания и минимизации ресурсозатрат на проведение ТО. Данные требования могут быть заданы по результатам анализа функций, возлагаемых на данное оборудование по минимальному набору элементов СЭС, которые постоянно должны находиться в работе.

4. Определение множества альтернативных вариантов значений параметров ТО элементов СЭС. На данном этапе необходимо сопоставить отдельные параметры ТО с множеством возможных их значений и учетом допустимых пределов. Определяются численные значения отдельных показателей эффективности функционирования системы, и производится проверка выполнения ограничений.

5. Определение значений отдельных показателей производится с использованием моделей, описанных [2] для различных моделей СЭС, которые состоят из минимального количества элементов, необходимых для выполнения задачи объекта. По результатам данного этапа из дальнейшего рассмотрения исключаются варианты, для которых не выполняется хотя бы одно из ограничений вида (3).

6. Определение множества вариантов технического обслуживания элементов СЭС. В этом блоке необходимо минимизировать количество сценариев проведения ТО для различных элементов СЭС [2].

7. Определение множества Парето-оптимальных решений. В [3] принято, что вариант значений параметров  $u_0$  называется эффективным (или Парето-оптимальным), если на множестве допустимых вариантов значений параметров не существует такого варианта значений параметров  $u^*$ , для которого выполнялись бы неравенства и хотя бы одно из них было строгим:

$$\begin{aligned} f_i(u^*) &\geq f_i(u_0), \forall_i \in I^1 \\ f_i(u^*) &\leq f_i(u_0), \forall_i \in I^2 \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f_i(u)$  – значения  $i$ -го показателя качества на варианте значений параметров технического обслуживания;

$I^1, I^2$  – соответственно множества индексов для показателей, которые должны стремиться к максимуму своего значения или минимуму качества функционирования СЭС в целом.

8. Определение параметров ТО элементов СЭС объекта. Решается многокритериальная задача оптимизации вида (2), эффективным решением для которой является то, что относительные потери по отдельным показателям качества функционирования системы будут минимальны, т. е.

$$\rho_i w_i(u^k) = \dots = \rho_M w_M(u^k) = \min \rho_i w_i(u^k), \quad (5)$$

где  $M$  – множество частных показателей эффективности;

$\rho_i$  – весовые коэффициенты относительной важности отдельных показателей функционирования системы, удовлетворяющие условиям:

$$\rho_i > 0, \sum_{i \in I} \rho_i = 1;$$

$w_i(u)$  – относительные отклонения от оптимальных показателей эффективности функционирования при следующем критерии параметра:  $0 \leq w_i(u) \leq 1$ .

Отклонения от оптимальных значений определяются следующим образом:

$$w_i = \frac{f_i(\bullet) - f_i^0}{f_i^* - f_i^0}, \quad (6)$$

где  $f_i^0$  и  $f_i^*$  – соответственно оптимальное и наихудшее значения  $i$ -го показателя эффективности, достигаемые на множестве вариантов решений с учетом ограничений.

Весовые коэффициенты относительной важности параметра ТО определенного элемента будем считать заданными.

В [3] предложено найти решение данной задачи следующим образом:

$$u^k = \arg \min \max \rho_i w_i(u). \quad (7)$$

В итоге, решением задачи определения оптимального варианта значений параметров ТО элементов СЭС является такой набор значений параметров ТО для каждого элемента, при

которых максимальное взвешенное отклонение от полученных оптимальных значений на множестве показателей является минимальным [3]:

$$\sum_{i \in I} \rho_i w_i(u) \rightarrow \min_{u^k \in U^k}, \quad (8)$$

При получении нескольких «сценариев» проведения ТО элементов СЭС, удовлетворяющих заданным требованиям, для минимизации вариантов необходимо будет ввести дополнительный показатель или задать новые критерии одному из уже используемых показателей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное обоснование необходимости развития теории управления процессами эксплуатации СЭС объектов военной инфраструктуры и описанный в работе механизм определения конкретных значений параметров ТО элементов СЭС позволят более эффективно управлять параметрами функционирования СЭС, не снижая значений надежности электрообеспечения потребителей. В свою очередь, это окажет значительное влияние на экономические показатели эксплуатации СЭС и объекта в целом.

## Список используемых источников

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – 6-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2003. – 832 с.
2. Романов С. В., Двинин В. А., Шуневич Н. А. Построение оптимальной системы технической эксплуатации систем электроснабжения при жестко детерминированных временных показателях технического обслуживания // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 12-2. – С. 334–337.
3. Justification of the preferred embodiment of construction and operation of the system design geographically distributed information system on vector technical and economic indicators / E. A. Mironov [et al.]. // Branch «Voskhod» of the Moscow aviation institute (national research university). – URL: <https://www.vestnikmai.ru> (дата обращения: 23.02.2020).

В. В. Карагодин,  
*доктор технических наук, профессор;*  
Б. А. Ревяков,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Д. В. Рыбаков,  
*кандидат технических наук*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА MATLAB**

Модернизация и реконструкция ракетно-космических комплексов неизбежно влекут за собой изменение принципиальных схем систем электроснабжения и замену их элементов, изменение режимов работы основного электрооборудования и объема энергопотребления. Решение данных задач невозможно без проведения многочисленных и порой громоздких математических расчетов по определению параметров оборудования и различных режимов работы электрической сети. В статье рассмотрена возможность исследования аварийных режимов работы распределительных электрических сетей методами имитационного математического моделирования с помощью применения математического пакета *MatLab*.

Ключевые слова: система электроснабжения, аварийные режимы, токи короткого замыкания, математическое моделирование.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Переход на новые типы вооружения и военной техники в Вооруженных силах Российской Федерации проводится в соответствии с Государственной программой вооружения на 2018–2027 гг. Современный этап развития и совершенствования объектов военной инфраструктуры Космических войск заключается в модернизации стартовых комплексов под современные типы ракет космического назначения.

Данный процесс неизбежно влечет за собой изменение принципиальных схем систем электроснабжения (СЭС), режимов работы основного электрооборудования и объема энергопотребления. При этом возникает необходимость в замене многих элементов систем электроснабжения, выработавших свой ресурс и морально устаревших.

Выбор и проверка правильности выбора оборудования, схемных решений СЭС невозможны без проведения математических расчетов параметров оборудования и различных режимов работы электрической сети, которые могут быть весьма многочисленными и громоздкими, требующими значительных временных затрат.

В связи с этим, а также с появлением различных инструментов моделирования, таких как *MatLab Maple*, *MathCAD*, актуальным становится разработка имитационных математических моделей СЭС для исследования нормальных и аварийных режимов их работы. Данная задача имеет практическое значение при осуществлении модернизации и реконструкции СЭС ракетно-космических комплексов.

### **ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ**

Рассмотрим возможность использования имитационной математической модели фрагмента распределительной сети СЭС ракетно-космического комплекса в пакете *MatLab* для исследования аварийного режима – режима трехфазного короткого замыкания.

Выбор электрооборудования осуществляется по параметрам нормальных установившихся режимов с учетом допустимых перегрузок. После чего проводится проверка правильности выбора по условиям аварийных (кратковременных) режимов [1].

Под аварийным режимом понимается резкое изменение токов и напряжений в электрической системе, представляющих угрозу повреждения оборудования потребителей и элементов сети, а также может повлечь за собой травматизм личного состава расчетов [2].

Режим трехфазного короткого замыкания (КЗ), по результатам которого осуществляется уточнение параметров выбранного электрооборудования, а также выбор устройств релейной защиты и автоматики, является расчетным аварийным режимом СЭС.

В соответствии с [3], если погрешность расчетов не превышает 10 %, то допускается использование упрощенных методов расчета токов КЗ. При этом определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, начальное значение апериодической составляющей тока КЗ, а также ударный ток КЗ.

Рассмотрим методику расчета токов КЗ на примере фрагмента типовой расчетной схемы СЭС (рис. 1), включающей в себя:

- кабельную линию электропередачи напряжением 6 кВ (КЛ1);
- высоковольтный масляный выключатель (ВМ);
- понижающий силовой трансформатор (ТМГ-400/6);
- автоматический выключатель на стороне низшего напряжения силового трансформатора (АВ1);
- линейные автоматические выключатели (АВ2 и АВ3);
- кабельные линии электропередачи на напряжение 0,4 кВ (КЛ2 и КЛ3);
- вводные автоматические выключатели (АВ4 и АВ5);
- групповые автоматические выключатели главных распределительных щитов ГРЩ1 и ГРЩ2 (АВ6 и АВ7).

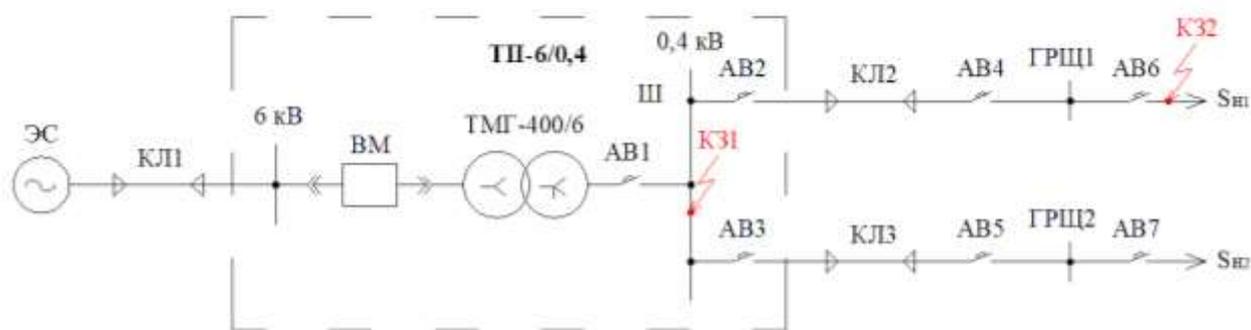


Рис. 1. Расчетная схема системы электроснабжения объекта военной инфраструктуры

Способ электроснабжения потребителей (от силового трансформатора СЭС или от автономного источника) определяет подход к расчету начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ в электроустановках до 1 кВ.

Учитывая, что электроснабжение потребителей в рассматриваемом случае осуществляется через силовой трансформатор марки ТМГ-400/6, то начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ ( $I_{п0}$ ) можно рассчитать по формуле, без учета подпитки электродвигателя:

$$I_{п0} = \frac{U_{\text{ср.номН}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ср.номН}}$  – среднее номинальное напряжение на выходе силового трансформатора, В.

Суммарные активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности в цепи трехфазного короткого замыкания в точке КЗ1 схемы системы электроснабжения могут быть определены следующим образом:

$$R_{1\Sigma} = r_T + r_{\text{кАВ1}} + r_{\text{ш}} + r_{\text{к}}; \quad (2)$$

$$X_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_{\text{кАВ1}} + x_{\text{ш}}, \quad (3)$$

- где  $x_c, r_T$  и  $x_T$  – параметры сети и силового трансформатора, мОм;  
 $r_{\text{кАВ1}}$  и  $x_{\text{кАВ1}}$  – параметры токовых катушек и контактов автоматического выключателя АВ1, мОм;  
 $r_{\text{ш}}$  и  $x_{\text{ш}}$  – параметры шинпроводов, мОм;  
 $r_{\text{к}}$  – параметры контактных соединений, мОм.

В точке КЗ2:

$$R_{1\Sigma} = r_T + r_{\text{кАВ1}} + r_{\text{ш}} + r_{\text{к}} + r_{\text{кАВ2}} + r_{\text{КЛ2}} + r_{\text{кАВ4}} + r_{\text{кАВ6}}; \quad (4)$$

$$X_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_{\text{кАВ1}} + x_{\text{ш}} + x_{\text{кАВ2}} + x_{\text{КЛ2}} + x_{\text{кАВ4}} + x_{\text{кАВ6}}, \quad (5)$$

- где  $r_{\text{кАВ2}}, r_{\text{кАВ4}}, r_{\text{кАВ6}},$   
 $x_{\text{кАВ2}}, x_{\text{кАВ4}}, x_{\text{кАВ6}}$  – активные и индуктивные сопротивления элементов автоматических выключателей АВ2, АВ4, АВ6 соответственно, мОм;  
 $r_{\text{КЛ2}}$  и  $x_{\text{КЛ2}}$  – параметры кабельных линий электропередачи, мОм.

Приведенное к ступени низшего напряжения сети эквивалентное индуктивное сопротивление системы  $x_c$  определяется по формуле

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.номН}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{откл.ном}} U_{\text{ср.номВ}}}, \quad (6)$$

- где  $U_{\text{ср.номН}}$  – среднее номинальное напряжение сети, к которой подключен силовой трансформатор, В;  
 $I_{\text{откл.ном}}$  – номинальный ток отключения высоковольтного выключателя, кА.

При этом источник, питающий силовой трансформатор, является источником неограниченной мощности.

Параметры силового трансформатора ( $r_T, x_T$ ), приведенные к ступени низшего напряжения сети с учетом паспортных данных силового трансформатора ( $\Delta P_{\text{кз}}, \text{кВт}; U_{\text{номН}}, \text{кВ}; S_{\text{т.ном}}, \text{кВ}\cdot\text{А}; u_{\text{кз}}$ ), определяются по формулам:

$$r_T = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{номН}}^2}{S_{\text{т.ном}}}; \quad (7)$$

$$x_T = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{кз}}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{т.ном}}}\right)^2} \frac{U_{\text{номН}}^2}{S_{\text{т.ном}}}. \quad (8)$$

Амплитуду периодической составляющей тока в начальный момент КЗ:

$$i_{a0} = \sqrt{2} I_{\text{п0}}, \quad (9)$$

как правило, принимают за наибольшее начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ ( $i_{a0}$ ).

В электроустановках с одним источником энергии (в качестве такового может выступать автономный источник электроэнергии или вторичная обмотка питающего трансформатора) ударный ток трехфазного КЗ ( $i_{уд}$ ) рассчитывается по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} \kappa_{уд}, \quad (10)$$

где  $\kappa_{уд}$  – ударный коэффициент, который можно определить по методике, приведенной в литературе [3].

Пользуясь методикой, приведенной выше, определим токи трехфазного короткого замыкания в точках КЗ1 и КЗ2 системы электроснабжения объекта военной инфраструктуры (см. рис. 1).

Исходные параметры электрооборудования для решения поставленной задачи следующие:

– силовой трансформатор ТМГ-400/6:

$$S_{т.ном} = 400 \text{ кВА}; U_{номВ} = 6 \text{ кВ}; U_{номН} = 0,4 \text{ кВ}; I_{хх} = 1,8 \text{ \%};$$

$$U_{кз} = 4,5 \text{ \%}; \Delta P_{хх} = 0,76 \text{ кВт}; \Delta P_{кз} = 5,5 \text{ кВт};$$

– высоковольтный выключатель ВМ – ВМП-10:

$$I_{ном} = 630 \text{ А}; I_{откл.ном} = 12,5 \text{ кА};$$

– кабельные линии электропередачи:

$$\text{КЛ2 – ВБбШнг 4x50: } r_0 = 0,37 \text{ Ом/км}; x_0 = 0,06 \text{ Ом/км}; l_k = 0,3 \text{ км};$$

$$\text{КЛ3 – ВБбШнг 4x50: } r_0 = 0,37 \text{ Ом/км}; x_0 = 0,06 \text{ Ом/км}; l_k = 0,25 \text{ км};$$

– шинопровод Ш тип ШМА-4-1600:

$$l_{ш} = 20 \text{ м}; r_{0ш} = 0,03 \text{ мОм/м}; x_{0ш} = 0,014 \text{ мОм/м};$$

– болтовые контактные соединения  $r_k = 0,003 \text{ мОм}$ ; число соединений  $n = 10$ ;

– параметры нагрузки, заданной как активной, так и индуктивной составляющей:

$$S_{н1} = 120 + j60 \text{ кВА}; S_{н2} = 100 + j40 \text{ кВА}.$$

Параметры автоматических выключателей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры автоматических выключателей

Автоматический выключатель	Параметры автоматических выключателей		
	$I_{ном}, \text{ А}$	$r_k, \text{ мОм};$	$x_k, \text{ мОм};$
АВ1 – ВА88-40	600	0,41	0,13
АВ2 – ВА88-37	400	0,65	0,17
АВ3 – ВА88-37	400	0,65	0,17
АВ4 – ВА57-35	250	1,1	0,5
АВ5 – ВА57-35	250	1,1	0,5
АВ6 – ВА57-35	200	1,1	0,5
АВ7 – ВА57-35	200	1,1	0,5

Результаты расчетов токов трехфазного короткого замыкания в точке КЗ1 и в точке КЗ2 показаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов токов трехфазного короткого замыкания

Точка расчета, место короткого замыкания	Расчетные параметры режима короткого замыкания		
	$I_{п0}, \text{ кА}$	$i_{a0}, \text{ кА}$	$i_{уд}, \text{ кА}$
КЗ1	11,7	16,5	21,4
КЗ2	1,8	2,5	2,5

Приведенная методика расчета существенно усложняется при рассмотрении более разветвленных СЭС [4]. Расчеты становятся более трудоемкими и требующими длительного времени. В связи с этим, для исследования аварийных режимов работы систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры целесообразно применение современных методов имитационного математического моделирования, получающих более широкое распространение при решении аналогичных задач.

В частности, поставленная выше задача может быть успешно решена с помощью расширений *Simulink* и *SimPowerSystems* программного продукта *MatLab*, предназначенных для имитационного моделирования как сложных электроэнергетических систем, так и отдельных ее элементов (подсистем). Входящий в состав расширения *SimPowerSystems* блок *Powergui* является инструментом графического интерфейса пользователя и обеспечивает решение ряда важных в рассматриваемой области задач [5].

На рис. 2 представлена имитационная математическая модель, полученная на основе расчетной схемы СЭС объекта военной инфраструктуры, приведенной на рис. 1.

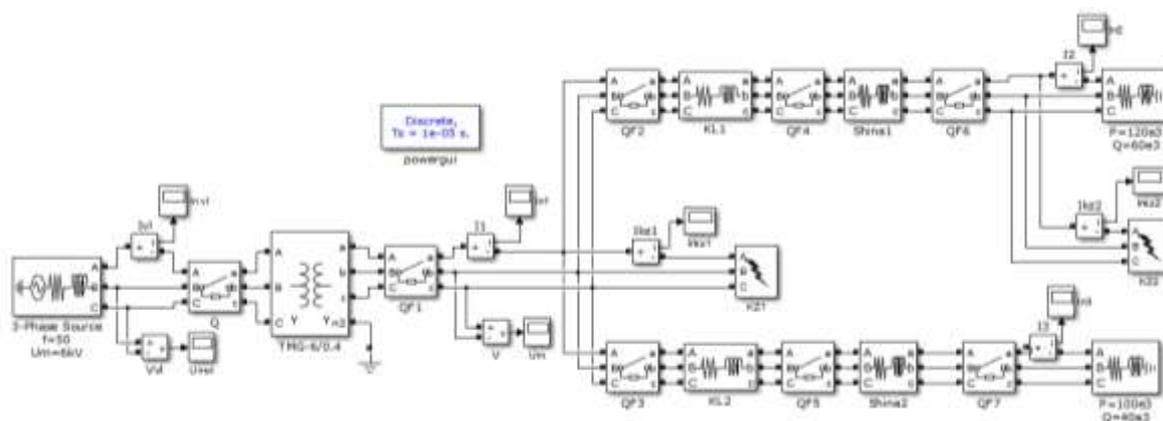


Рис. 2. Имитационная математическая модель системы электроснабжения объекта военной инфраструктуры в среде *Simulink*

На рис. 2 блок 3-Phase Source имитирует работу трехфазной электрической сети с источником неограниченной мощности частотой 50 Гц напряжением 6 кВ; блок Q – работу высоковольтного выключателя ВМП-10; блок TMG-6/0,4 – работу понижающего силового трансформатора ТМГ-400/6; блок QF1 – работу автоматического выключателя на стороне низшего напряжения силового трансформатора АВ1; блоки QF2 и QF3 – линейных автоматических выключателей АВ2 и АВ3 соответственно; блоки QF4 и QF5 – работу вводных автоматических выключателей АВ4 и АВ5 соответственно; блоки QF6 и QF7 – работу групповых автоматических выключателей главных распределительных щитов ГРЩ1 и ГРЩ2 АВ6 и АВ7 соответственно; блоки KL1 и KL2 – работу кабельных линий электропередачи на напряжение 0,4 кВ КЛ2 и КЛ3 соответственно; блоки *Shina1* и *Shina2* – работу шинопроводов ГРЩ1 и ГРЩ2 соответственно. Кроме элементов силового электрооборудования имитационная математическая модель также содержит измерительные приборы, осциллографы  $I_n$ ,  $U_m$ ,  $I_n$ ,  $U_m$  и т. д., предназначенные для измерения параметров электрической сети (токов и напряжений) на различных участках СЭС объекта военной инфраструктуры.

После запуска модели получены графики переходных процессов (временные диаграммы) для токов и напряжений в линиях электропередачи, на нагрузках при различных аварийных режимах работы системы электроснабжения.

Временные диаграммы токов, протекающих в одной из фаз (фазе А) элементов СЭС при возникновении трехфазного короткого замыкания в точке К31, показаны на рис. 3, в точке К32 – на рис. 4.

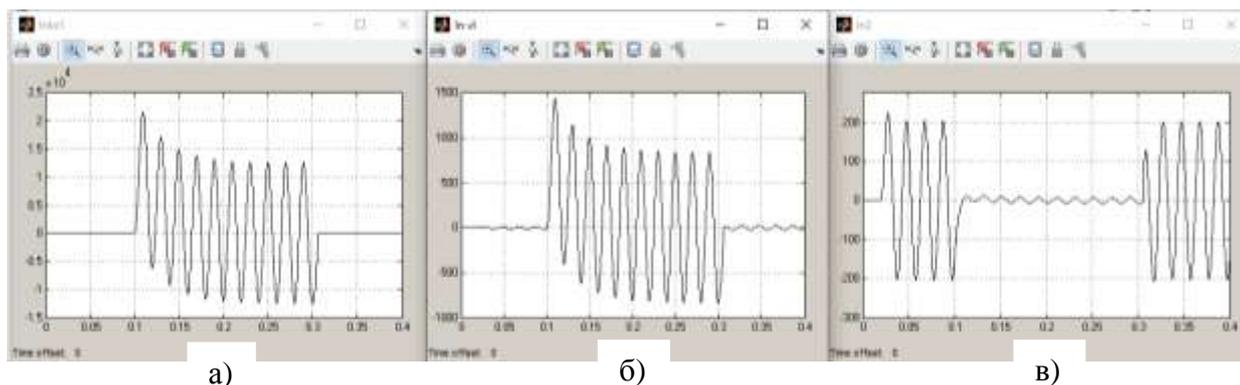


Рис. 3. Переходные процессы при коротком замыкании в точке К31:  
 а – временная диаграмма тока в цепи короткого замыкания (осциллограф  $I_{nkz1}$ );  
 б – временная диаграмма тока в линии электропередачи напряжением 6 кВ  
 (осциллограф  $I_{nvl}$ ); в – временная диаграмма тока в цепи нагрузки ГРЦ1 (осциллограф  $I_{n2}$ )

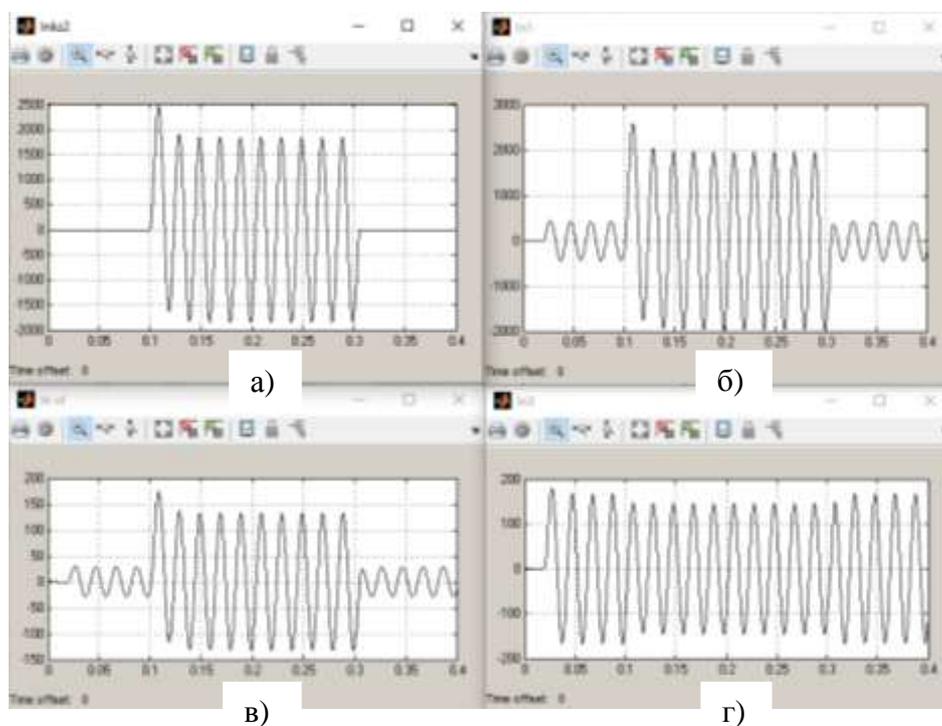


Рис. 4. Переходные процессы при коротком замыкании в точке К32:  
 а – временная диаграмма тока в цепи короткого замыкания (осциллограф  $I_{nkz2}$ );  
 б – временная диаграмма тока во вторичной цепи понижающего трансформатора  
 (осциллограф  $I_{n1}$ ); в – временная диаграмма тока в линии электропередачи  
 напряжением 6 кВ (осциллограф  $I_{nvl}$ ); г – временная диаграмма тока  
 в цепи нагрузки ГРЦ2 (осциллограф  $I_{n3}$ )

Временные диаграммы позволяют оценить изменение параметров переходных процессов, проходящих в системе электроснабжения, во времени: в момент времени  $t = 0,1$  с (возникновение короткого замыкания в точках К31 или К32) и в момент времени  $t = 0,3$  с (отключение тока короткого замыкания). Значения токов короткого замыкания в различных аварийных режимах приведены в табл. 3 и соответствуют значениям, полученным с помощью теоретических расчетов.

Таблица 3

## Значения токов короткого замыкания при различных аварийных режимах

Аварийный режим	$I_{\text{п0}}$ , кА	$i_{\text{с0}}$ , кА	$i_{\text{у0}}$ , кА
Короткое замыкание в точке КЗ1	11,7	16,5	21,4
Короткое замыкание в точке КЗ2	1,8	2,5	2,5

Возможности математического моделирования, кроме определения токов короткого замыкания, также позволяют исследовать и зависимости величины полного тока короткого замыкания от начальной фазы приложенного напряжения в момент возникновения КЗ (рис. 5). Начальной фазой  $\alpha$  называется угол от момента перехода синусоиды напряжения через нуль при возрастании мгновенных значений до момента возникновения КЗ [2].

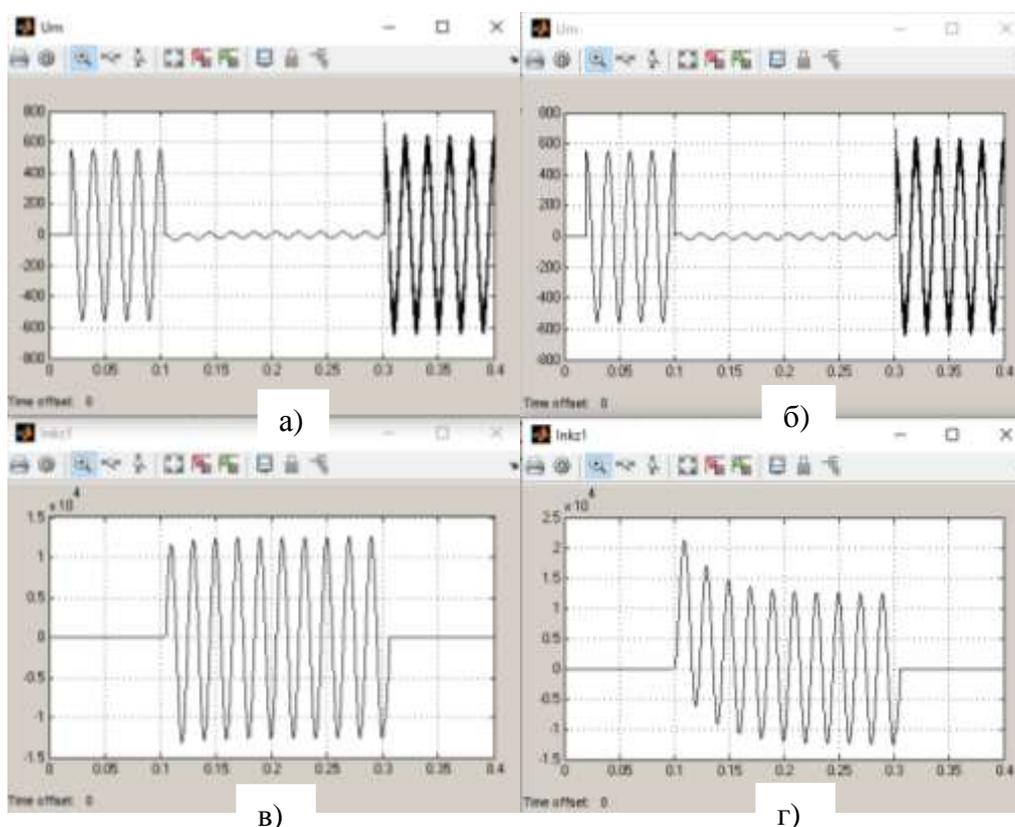


Рис. 5. Переходные процессы в точке КЗ1 в зависимости от начальной фазы приложенного напряжения:

- а* – временная диаграмма напряжения при начальной фазе  $\alpha = \varphi_k$  (осциллограф  $U_m$ );
- б* – временная диаграмма напряжения при начальной фазе  $\alpha = \varphi_k + \pi/2$  (осциллограф  $U_m$ );
- в* – временная диаграмма тока в цепи короткого замыкания при начальной фазе  $\alpha = \varphi_k$  (осциллограф  $I_{\text{кз1}}$ );
- г* – временная диаграмма тока в цепи короткого замыкания при начальной фазе  $\alpha = \varphi_k + \pi/2$  (осциллограф  $I_{\text{кз1}}$ )

Величина полного тока короткого замыкания зависит от начальной фазы напряжения [2, 6]. При  $\alpha = \varphi_k$  (рис. 5,а) апериодическая слагаемая тока не возникает (рис. 5,в). При  $\alpha = \varphi_k + \pi/2$  (рис. 5,б) апериодическая составляющая тока имеет наибольшее значение, а через

полупериода после наступления короткого замыкания полный ток достигает своего максимального значения (рис. 5,з).

Таким образом, математический пакет *SimPowerSystems* в составе *Simulink* может быть использован для моделирования и последующего анализа систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры в различных режимах. Выше приведенные примеры демонстрируют относительную простоту и наглядность моделирования процессов, проходящих в распределительных электрических сетях при работе в аварийных режимах. Знание величины токов короткого замыкания обеспечит правильный выбор оборудования электрических сетей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи определения токов короткого замыкания в системах электроснабжения объектов военной инфраструктуры является весьма трудоемким процессом. Для разветвленных электрических сетей (с большим количеством элементов, сложной конфигурацией) подобные расчеты могут быть существенно упрощены с помощью применения современных математических пакетов (программных продуктов). Так возможности расширений *Simulink* и *SimPowerSystems* программного продукта *MatLab* позволяют анализировать работу различных электрических устройств и систем во временной области, решать задачи анализа и определять свойства отдельных участков и системы электроснабжения в целом.

## Список используемых источников

1. *Крючков И. П., Неклепаев Б. Н., Старишинов В. А.* Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования. – М.: Академия, 2008. – 416 с.
2. *Олин Д. М., Попов Н. М.* Переходные процессы в электрических сетях: учеб. пособие. – Кострома: КГСХА, 2013. – 103 с.
3. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 44 с.
4. *Карагодин В.В., Рыбаков Д. В., Рыжий Н. В.* Применение частотного метода для исследования распределительных электрических сетей специальных объектов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 221–228.
5. *Черных И. В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
6. Электрическая часть военных станций и подстанций / А. А. Грищенко-Меленевский [и др.]. – М.: Издание ВИА, 1977. – Ч. 1: Электрооборудование первичных цепей – 439 с.

В. В. Карагодин,  
*доктор технических наук, профессор;*  
Д. В. Рыбаков,  
*кандидат технических наук;*  
С. В. Смирнов,  
*кандидат технических наук, доцент*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Модернизация и реконструкция систем электроснабжения специальных комплексов будут проводиться на основе внедрения новых нелинейных управляемых элементов сети, предназначенных для снижения электрических потерь (инерционный сценарий развития), а также путем внедрения цифровых технологий в электроэнергетические системы (инновационный сценарий развития). И в том и другом случае возникает проблема электромагнитной совместимости технических средств с питающей сетью за счет влияния потребителей в местах их подключения к электрической сети на качество электроэнергии. В статье рассмотрен вопрос управления качеством электрической энергии на основе учета влияния потребителей электроэнергии в точке подключения на показатели качества электроэнергии.

Ключевые слова: система электроснабжения, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, показатель качества электроэнергии, допустимый расчетный вклад потребителя в показатель качества электроэнергии.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В соответствии с [1] совершенствование систем электроснабжения специальных комплексов в настоящее время может осуществляться на основе внедрения новых нелинейных управляемых элементов сети, предназначенных для снижения электрических потерь (инерционный сценарий развития), а также путем внедрения цифровых технологий и создания интеллектуальной системы электроснабжения с элементами активно-адаптивной сети (инновационный сценарий развития) [1, 2]. В обоих случаях обостряется проблема электромагнитной совместимости технических средств с питающей сетью, обусловленная влиянием потребителей на качество электроэнергии (КЭ) в местах их подключения к электрической сети.

Электромагнитная совместимость технических средств – это способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам [3].

С достаточной степенью обоснованности можно полагать, что электромагнитная совместимость потребителей электрической энергии с питающей сетью в точке подключения к сети (ТПС) обеспечена, если данная точка совпадает с точкой передачи энергии и нормируемые показатели качества электрической энергии (ПКЭ) в данной точке находятся в заданных пределах. В этом случае значение показателя качества можно рассматривать в качестве уровня электромагнитной совместимости для потребителя.

Основные характеристики КЭ для электрических сетей напряжением до 220 кВ установлены в [4], здесь же установлены шесть нормируемых ПКЭ.

Задача управления КЭ, с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости, сводится к обеспечению технически допустимых значений показателей КЭ в ТПС. Отклонение данных показателей от их допустимых значений приводит к нарушению электромагнит-

ной совместимости потребителя с питающей сетью, т. е. к нарушениям нормальной работы электроприемников, последствиями которых могут быть снижение производительности приводимых в действие механизмов, сокращение срока службы, ложные срабатывания элементов защиты и другие виды технологического и электромагнитного ущерба. Из-за нарушений качества электрической энергии экономический ущерб в России, по некоторым оценкам, достигает десятков миллиардов долларов в год [5].

До вступления в силу Федеральных законов № 184–ФЗ «О техническом регулировании» [6] и № 35–ФЗ «Об электроэнергетике» [7] обеспечение КЭ являлось задачей, которая решалась на государственном уровне. В этой области были наработаны значительные успехи и были введены экономические рычаги воздействия на потребителей в области соблюдения качества электрической энергии. Такими успехами следует считать публикацию двух документов: «Правил присоединения потребителей к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии» [8] и «Правил применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии» [9]. К сожалению, принятие закона № 184–ФЗ «О техническом регулировании» сделало необязательным, а добровольным выполнение стандарта по качеству электрической энергии. В свою очередь, принятие закона № 35–ФЗ «Об электроэнергетике» привело к появлению большого числа субъектов электроэнергетики со своими собственными интересами, среди которых вопросы качества электроэнергии перестали быть первоочередными. Таким образом, проблема КЭ в целом стала второстепенной.

Очевидно, что в рамках грядущей реконструкции и модернизации систем электроснабжения, с учетом перспективы создания интеллектуальных электроэнергетических систем, отношение к проблеме обеспечения качества электроэнергии должно измениться кардинальным образом. Первостепенное значение решение этой проблемы имеет для систем электроснабжения специальных комплексов, ответственные потребители которых для решения задач по предназначению предъявляют требования не только по надежности и бесперебойности электроснабжения, но и по КЭ.

## **УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Задача обеспечения КЭ в системах электроснабжения специальных комплексов на сегодняшний день является значимой, но до конца не решенной. Это связано с тем, что КЭ в системах электроснабжения зависит как от деятельности энергоснабжающих организаций, так и от функционирования технических средств потребителей электроэнергии.

В настоящее время на фоне общей тенденции старения объектов электросетевого хозяйства специальных комплексов происходит одновременный рост числа чувствительных к помехам электронных и цифровых элементов в составе систем контроля и управления технологическими процессами и числа потребителей с нелинейными вольт-амперными характеристиками, являющихся мощными источниками высокочастотных кондуктивных помех.

Возникающее противоречие между ростом эмиссии электромагнитных помех от нелинейных элементов и снижением помехоустойчивости систем из-за наличия в них электронных и цифровых устройств может быть разрешено только обеспечением качества электроэнергии путем усиления требований к допустимому влиянию конкретного потребителя на значения ПКЭ в ТПС.

Управление качеством любой продукции (электрическая энергия является конечной продукцией систем электроснабжения) предполагает решение трех задач:

- задания требований к параметрам продукции;
- проверки соответствия фактических значений параметров продукции требуемым;

– выработки управляющих воздействий, приводящих к сближению фактических и требуемых значений параметров продукции.

Поэтому управление вкладом конкретного потребителя в значения ПКЭ в ТПС можно представить в виде системы управления, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

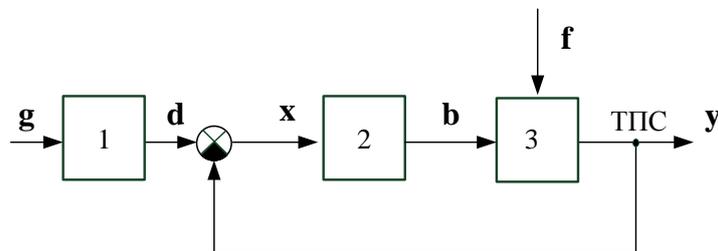


Рис. 1. Функциональная схема системы управления допустимым вкладом потребителя в значения ПКЭ

На рис. 1 блок 1 предназначен для формирования (расчета) на основе информации, содержащейся в  $g$ , об электроприемниках потребителя, элементов  $d$ , которые являются допустимыми значениями расчетных вкладов потребителя в ПКЭ.

Рассогласование между требуемым и фактическим значениями вкладов потребителя в конкретные ПКЭ в ТПС определяет сравнивающее устройство, формирующее вектор ошибки  $x$ .

На основании вектора ошибки  $x$  в блоке 2 формируются управляющие воздействия  $b$  технического или иного характера, направленные на минимизацию элементов вектора ошибки. Управляющие воздействия  $b$  совместно с возмущающими воздействиями  $f$  прикладываются к объекту управления (блок 3), представляющему из себя совокупность электроприемников потребителя, оказывающих непосредственное влияние на управляемую величину  $y$ , элементами которой являются фактические значения вклада потребителя в ПКЭ в ТПС.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЯ В ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К СЕТИ

В основу работы блока 1 по расчету допустимого расчетного вклада (ДРВ) потребителя в ПКЭ в ТПС может быть положена методика, приведенная в [8].

Данная методика применяется для расчета вклада в ПКЭ в точке передачи энергии, к которым относятся:

$K_{2U}$  – коэффициент несимметрии  $U$  по обратной последовательности;

$K_{0U}$  – коэффициент несимметрии  $U$  по 0-й последовательности;

$K_{U(n)}$  – коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей  $U$ ;

$K_U$  – значение суммарного коэффициента гармонических составляющих  $U$ .

Для отдельного потребителя, присоединенного к сети энергоснабжающей организации, ДРВ в ПКЭ, как правило, меньше нормируемых значений, так как потребителей, получающих электроэнергию от сети данной энергоснабжающей организации и влияющих на ПКЭ, может быть несколько.

Порядок вычисления значения ДРВ для отдельного потребителя для любого ПКЭ в ТПС подробно рассмотрен в методике [8].

Электроснабжение потребителей часто осуществляется от однострансформаторных и двухтрансформаторных подстанций.

При питании от однострансформаторной подстанции ее  $P_{пр}$  (пропускная способность) определяется по номинальной мощности трансформатора, а именно мощность трансформатора должна быть равна расчетной мощности потребителя.

При питании от двухтрансформаторной подстанции с выключенным секционным выключателем пропускную способность подстанции определяют по номинальной мощности одного из двух выбранных одинаковых трансформаторов

$$S_T = k \cdot S_p, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от типа трансформатора и нагрузочной способности трансформаторов. Для масляных трансформаторов  $k = (0,65-0,7)$  при питании потребителей первой категории;  $k = (0,7-0,8)$  при питании потребителей второй категории; для сухих трансформаторов  $k = 0,9$ .

Если питание потребителя осуществляется от двухтрансформаторной подстанции с включенным секционным выключателем пропускная способность подстанции принимается равной удвоенной номинальной мощности (1) выбранных одинаковых трансформаторов.

Согласно методике [8], показатель распределяемый  $P_r$  (часть ПКЭ, распределяемая между потребителями, присоединенными в данной ТПС), нормируется для каждого ПКЭ. Для показателей качества  $K_{2U}$ ,  $K_{0U}$  нормативные значения  $P_r$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Нормативные значения  $P_r$ 

ПКЭ	Нормальное/мах, %
$K_{2U}$	1,4/2,8
$K_{0U}$	2,0/4,0

Для коэффициентов  $K_U$ ,  $K_{U(n)}$  нормативные значения  $P_r$  зависят также от напряжения питания  $U$  в ТПС. Для данных показателей качества значения  $P_r$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Нормативные значения  $P_r$ 

$U$ , кВ	Мах для $K_{U(n)}$ $n$ -й гармонической составляющей, создаваемой преобразователями, %				Нормальное/мах для $K_U$ , %
	$n = 3, 5, 7$	$n = 11, 13$	$n$ нечётн. $> 13$	$n$ чётн.	
110/110	1	1,2	1,4	0,7	1,3/2,6
110/35	2	2,4	2,8	1,4	2,0/4,0
35/35	3	3,4	3,7	1,9	2,5/5,0
35/(6-20)	3	3,6	4,1	2,1	3,2/6,4
110/(6-20)	4	4,5	4,8	2,4	3,6/7,2
(6-20)/0,4	3,5	4,3	4,8	2,0	3,9/7,8

В табл. 2 вариант напряжения питания  $U$  в ТПС приведен в виде дроби, в которой в числителе указано напряжение питающей подстанции, а в знаменателе напряжение сети.

Показатель  $a$  (показатель степени, учитывающий механизм суммирования долей от различных потребителей, искажающих ПКЭ в ТПС) также задается своими нормативными

значениями для каждого ПКЭ. Для показателей качества  $K_{2U}$ ,  $K_{0U}$ ,  $K_U$ ,  $K_{U(n)}$  его нормативные значения приведены в методике [8].

Если коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  создается совместно силовыми преобразовательными устройствами и другими электроприемниками (ЭП), то значение  $a$  определяют по формуле

$$a = a_n \cdot d_{np} + a_D \cdot d_D,$$

где  $d_{np}$ ,  $d_D$  – доля соответственно силовых преобразовательных устройств и других электроприемников в нагрузке потребителя;

$a_n$ ,  $a_D$  – значения показателя степени  $a$ , соответствующие  $n$ -й гармонической составляющей, создаваемой преобразовательным устройством или другим ЭП соответственно.

Если коэффициент  $K_U$  создается совместно различными преобразователями и другими ЭП, то значение  $a$  определяют по формуле:

$$a = a_n \cdot d_{np6} + a_n \cdot d_{np12} + a_D \cdot d_D,$$

где  $d_{np6}$ ,  $d_{np12}$  – доля в нагрузке потребителя 6-пульсных и 12-пульсных преобразовательных устройств соответственно ( $d_{np6} + d_{np12} + d_D = 1$ ).

Выполнение технических условий на присоединение в части влияния потребителя на качество электрической энергии в ТПС проверяется при проведении приемочных испытаний. При этом производится сравнение значений показателей качества электроэнергии до включения и после включения потребителя.

Влияние потребителя на КЭ в ТПС не превышает допустимого, если выполняется условие

$$\Delta P_D \geq (P_B^a - P_0^a)^{\frac{1}{a}},$$

где  $P_0$ ,  $P_B$  – значения ПКЭ до и после подключения потребителя соответственно.

#### Пример.

Требуется найти значения ДРВ, необходимого для включения в технические условия на присоединение потребителя мощностью  $P_n = 3$  МВт, в состав которого входят 6-пульсные силовые преобразовательные устройства и другие электроприемники, доли которых в нагрузке составляют соответственно  $d_{np6} = 0,5$ ,  $d_D = 0,5$  ( $d_{np6} + d_D = 1$ ). Рассматривается вариант электроснабжения потребителя от двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ с масляными трансформаторами  $S_{ном} = 10$  МВА. В нормальном режиме секционный выключатель между трансформаторами отключен.

#### Решение.

В соответствии с выражением (1) максимальная загрузка трансформатора не может быть больше 70%  $S_{ном}$ , т. е. пропускная способность подстанции  $P_{пр} = 0,7 \cdot 10 = 7$  МВА.

С учетом этого доля потребителя  $d_n$  составляет

$$d_n = \frac{P_n}{P_{пр}} = \frac{3}{0,7 \cdot 10} = 0,4.$$

Найдем ДРВ потребителя в максимальное значение коэффициентов  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$ .

Используя нормативные значения показателей [8], получим:

$$\Delta\Pi_{D(K_{2U})} = \Pi_{P(K_{2U})} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 2,8 \cdot 0,4^{\frac{1}{2}} = 1,76\%;$$

$$\Delta\Pi_{D(K_{0U})} = \Pi_{P(K_{0U})} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 4,0 \cdot 0,4^{\frac{1}{2}} = 2,52\%.$$

Найдем ДРВ потребителя в максимальное значение коэффициента  $K_U$  в точке передачи энергии:

$$\Delta\Pi_{D(K_U)} = \Pi_{P(K_U)} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 7,2 \cdot 0,4^{1,65} = 4,18\%.$$

Получим выражение для ДРВ потребителя в максимальные значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ , создаваемых преобразователями в точке передачи энергии. При этом будем учитывать, что для 6-пульсных преобразователей характерны нечетные гармоники, причем преобладающими являются 5, 7, 11, 13-я гармоники [10]. Поэтому найдем ДРВ потребителя в максимальные значения показателей  $K_{U(5)}, K_{U(7)}, K_{U(11)}, K_{U(13)}, K_{U(17)}$ :

$$\Delta\Pi_{D(K_{U(5)})} = \Pi_{P(K_{U(5)})} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 4,0 \cdot 0,4^{\frac{1}{1,5}} = 2,16\%,$$

$$\Delta\Pi_{D(K_{U(7)})} = \Pi_{P(K_{U(7)})} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 4,0 \cdot 0,4^{\frac{1}{1,5}} = 2,16\%,$$

$$\Delta\Pi_{D(K_{U(11)})} = \Pi_{P(K_{U(11)})} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 4,5 \cdot 0,4^{\frac{1}{1,7}} = 2,61\%,$$

$$\Delta\Pi_{D(K_{U(13)})} = \Pi_{P(K_{U(13)})} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 4,5 \cdot 0,4^{\frac{1}{1,7}} = 2,61\%,$$

$$\Delta\Pi_{D(K_{U(17)})} = \Pi_{P(K_{U(17)})} \cdot d_n^{\frac{1}{a}} = 4,8 \cdot 0,4^{\frac{1}{2}} = 3,02\%.$$

Полученные значения ДРВ потребителя в различные ПКЭ представим в виде вектора допустимых значений:

$$\mathbf{d} = \left[ \Delta\Pi_{D(K_{2U})}; \Delta\Pi_{D(K_{0U})}; \Delta\Pi_{D(K_U)}; \Delta\Pi_{D(K_{U(5)})}; \Delta\Pi_{D(K_{U(7)})}; \Delta\Pi_{D(K_{U(11)})}; \Delta\Pi_{D(K_{U(13)})}; \Delta\Pi_{D(K_{U(17)})} \right]^T = \\ = [1,76; 2,52; 4,18; 2,16; 2,16; 2,61; 2,61; 3,02]^T.$$

Фактические значения вклада потребителя  $\Delta\Pi_{\phi(\text{ПКЭ})}$  в соответствующие ПКЭ, измеренные в ТПС, представим в виде вектора фактических значений:

$$\mathbf{y} = \left[ \Delta\Pi_{\phi(K_{2U})}; \Delta\Pi_{\phi(K_{0U})}; \Delta\Pi_{\phi(K_U)}; \Delta\Pi_{\phi(K_{U(5)})}; \Delta\Pi_{\phi(K_{U(7)})}; \Delta\Pi_{\phi(K_{U(11)})}; \Delta\Pi_{\phi(K_{U(13)})}; \Delta\Pi_{\phi(K_{U(17)})} \right]^T.$$

В этом случае вектор ошибки принимает вид

$$\mathbf{x} = \mathbf{d} - \mathbf{y} = [x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6; x_7; x_8]^T.$$

Элементы вектора

$$x_1 = 1,76 - \Delta\Pi_{\phi(K_{2U})}; x_2 = 2,52 - \Delta\Pi_{\phi(K_{0U})}; x_3 = 4,18 - \Delta\Pi_{\phi(K_U)}; x_4 = 2,16 - \Delta\Pi_{\phi(K_{U(5)})};$$

$$x_5 = 2,16 - \Delta\Pi_{\phi(K_{U(7)})}; x_6 = 2,61 - \Delta\Pi_{\phi(K_{U(11)})}; x_7 = 2,61 - \Delta\Pi_{\phi(K_{U(13)})}; x_8 = 3,02 - \Delta\Pi_{\phi(K_{U(17)})}$$

позволяют судить о допустимости или недопустимости величины фактического вклада потребителя в соответствующий ПКЭ и на основании этого принимать решение о выработке тех или иных корректирующих мероприятий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электромагнитная совместимость потребителей с питающей сетью обеспечивается при соблюдении норм КЭ в точках передачи энергии. По мере развития цифровой электроэнергетики проблема качества электрической энергии неуклонно возрастает. Для решения данной проблемы необходимо возвращаться к идее создания системы управления качеством электроэнергии, ключевым элементом которой является предъявление требований к потребителю по условиям его влияния на ПКЭ в ТПС.

## Список используемых источников

1. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 года. – М.: ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
2. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В., Рыжый Н. В. Обоснование направлений совершенствования систем электроснабжения наземных комплексов с учетом обеспечения информационной безопасности // Электропитание. – 2020. – № 1. – С. 32–40.
3. ГОСТ Р 50397–2011. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2012.
4. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
5. Добрусин Л.Н. Проблема качества электроэнергии и энергосбережения в России // Энергоэксперт. – 2008. – № 4(9). – С. 30–35.
6. О техническом регулировании: федеральный закон № 184-ФЗ от 27.12.2002 г. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_40241](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241) (дата обращения: 21.01.2021).
7. Об электроэнергетике: федеральный закон № 35-ФЗ от 26.03.2003 г. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_41502](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502) (дата обращения: 21.01.2021).
8. Правила присоединения потребителей к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии // Промышленная энергетика. – 1991. – № 8. – С. 45–48.
9. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии // Промышленная энергетика. – 1991. – № 8. – С. 49–51.
10. Жежеленко И. В., Короткевич М. А. Электромагнитная совместимость в электрических сетях. – Минск: Высшая школа, 2012. – 197 с.

Н. Б. Литвинова,  
*доктор педагогических наук;*  
Е. М. Росляков,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Ю. Е. Тупицин,  
*кандидат технических наук*

## **ПОДГОТОВКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА С ПОМОЩЬЮ ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В статье предлагается вариант подготовки персонала, эксплуатирующего специальные технические системы уникальных комплексов, посредством виртуальных тренажных средств, построенных с помощью *flash*-технологий, на примере виртуального тренажера «Холодильная установка типа ХМ ФУУ 80: пуск, останов, контроль параметров».

Ключевые слова: специальные технические системы, эксплуатация, виртуальный тренажер, холодильная установка, режимы пуска и останова.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Создание и поддержание требуемых параметров микроклимата в помещениях сооружений наземных комплексов обеспечивается функционированием специальных технических систем, включающих в свой состав системы вентиляции и кондиционирования воздуха, холодоснабжения, отопления, водоснабжения и системы дистанционного и автоматического управления специальными техническими системами.

Эксплуатация специальных технических систем сооружений наземных комплексов (СТС СНК) осуществляется силами подразделений, комплектуемых военнослужащими срочной службы. Руководство подразделениями, непосредственно эксплуатирующими СТС, осуществляют офицеры, обладающие, как правило, небольшим (до 1,5 лет) опытом эксплуатации.

Подготовка эксплуатационного персонала строилась на основе применения традиционных методов обучения, предусматривающих демонстрацию приемов работы на реальной технике или на тренажерах опытным командиром-инструктором.

Однако сокращение сроков срочной службы, некомплект опытного офицерского состава, а также усложнение техники, монтируемой на военных объектах в ходе их реконструкции и ремонта, обусловили повышение требований как к квалификации эксплуатирующего специальные технические системы персонала, так и к качеству процессов его подготовки.

Для СТС СНК как объектов эксплуатации характерны следующие особенности:

- уникальность объекта: каждый наземный комплекс выполнен в единственном экземпляре, а СТС отличаются по составу, схемным решениям, технологии управления;
- низкая обеспеченность эксплуатационной документацией;
- значительные сроки эксплуатации.

Из анализа указанных особенностей СТС следует, что применение тренажеров на реальном оборудовании для конкретного рассматриваемого объекта либо невозможно, либо экономически нецелесообразно.

## ВИРТУАЛЬНЫЕ УЧЕБНО-ТРЕНАЖНЫЕ СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ *FLASH*-ТЕХНОЛОГИИ

В процессе создания реальных тренажеров СТС для уникальных комплексов возникает ряд проблем, связанных с экономическими ограничениями и кадровым дефицитом. В то же время практика эксплуатации настоятельно требует подготовки высококвалифицированного персонала для практической работы на сложных технических системах.

Одним из возможных направлений решения задач практического обучения является применение виртуальных учебно-тренажных средств (ВУТС), построенных с применением информационных технологий [5–7].

Основными преимуществами использования технологии виртуальных тренажеров являются [6]:

- возможность оперативного оснащения виртуальных тренажеров, в отличие от реальных установок, современными приборами, агрегатами и устройствами;
- отсутствие необходимости использования расходных материалов и электрической энергии на привод и функционирование реального оборудования;
- возможность моделирования опасных и критичных ситуаций;
- обеспечение безопасности проведения практических занятий с использованием тренажеров;
- возможность временного масштабирования, т. е. сокращения времени выполнения операций на виртуальном тренажере по сравнению с реальной техникой;
- возможность многократности выполнения циклов обучения за ограниченное время;
- возможность имитации воздействия факторов внешних условий в широких диапазонах и любом сочетании.

Применение такого инструмента, как виртуальный тренажер, позволяет решить следующие задачи:

- обеспечить полный контроль усвоения изучаемого материала и получения практических навыков каждым обучающимся;
- разгрузить преподавателей и инженерно-технический состав от выполнения рутинных функций пооперационного контроля;
- обеспечить возможность самостоятельной работы обучающихся в часы самоподготовки и в удобное время.

ВУТС представляет собой аппаратно-программный комплекс, позволяющий управлять изучаемым объектом, представленным в виде его модели без непосредственного контакта с реальной средой [3]. Сердцевиной виртуального тренажера является программное обеспечение, включающее в себя систему графической визуализации, звуковое сопровождение и текстовую информацию.

Структуру программных средств виртуального тренажера составляют следующие элементы.

**Виртуальная модель изучаемого объекта**, отображающая изучаемый объект и технологию его управления. Изучаемый объект представляется в виде совокупности (комплекса, комплекта) принципиальных схем составных частей объекта, алгоритмов их функционирования, значений контролируемых и управляемых параметров. Все изображения элементов объекта создаются средствами рисования, которые предоставляет программа *Macromedia Flash* в векторной форме, что обеспечивает их качественное представление при любом масштабировании воспроизводства на экранах любых размеров [4].

Технология управления объектом может быть представлена с использованием средств *ActionScript*. Подобное представление объекта позволяет отразить все операции, выполняемые в процессе управления объектом, что необходимо в ходе его изучения, а также при отработке навыков выполнения технологических операций.

**Алгоритм работы с моделью**, включающий описание операций по запуску тренажера, выбору режима применения тренажера, приведению тренажера в исходное состояние.

**Средства обучения и самоконтроля** включают электронные учебные пособия, содержащие описание устройства изучаемого объекта и порядка его работы.

**Итоговая аттестация** осуществляется при сдаче зачета обучающимся либо преподавателю, либо аттестационной комиссии. В этом случае в процессе ответа допускается совершение ошибок, число которых заранее устанавливается, и при условии, что обучающийся самостоятельно их устраняет.

Реализация программного обеспечения ВУТС построена с применением *Flash*-технологии. Выбор данного продукта в качестве основы построения модели объекта обусловлен его достоинствами.

*Flash*-технологии объединили в себе множество мощных технологических решений в области интерактивного и мультимедийного представления информации [1, 2].

Данная технология была выбрана по следующим основаниям:

- *Flash*-продукты являются «легкими» с точки зрения размера конечного файла;
- *Flash*-продукты имеют в своем составе функции интерактивного вмешательства пользователя, что делает их более соответствующими развитию перспективной технологии *e-learning* в направлении к *smart-learning* и привлекательными для конечных пользователей, в том числе с точки зрения эргономики и дизайна [2].

Предложенный алгоритм и инструмент программирования применен при разработке тренажера управления холодильной установкой типа ХМ ФУУ 80 [9].

## **ВИРТУАЛЬНЫЙ ТРЕНАЖЕР «ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА ТИПА ХМ ФУУ 80: ПУСК, ОСТАНОВ, КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ»**

Методика выполнения практического занятия по данной теме изложена в пособии [8].

Цель практического занятия, проводимого с помощью виртуального тренажера – освоить технологии пуска и останова холодильной установки, входящей в состав специальных технических систем ракетно-космического комплекса.

Работа с тренажером начинается с авторизации, т. е. заполнения соответствующих полей: фамилия обучающегося, логин, пароль.

Далее выполняется первый этап практического занятия: изучение содержания практического занятия и тестирование на допуск к работе на тренажере [6]. Тестирование оценивается по результатам ответов на комплекс контрольных вопросов, отражающих весь изучаемый материал.

При положительном результате тестирования обучающийся переходит ко второму этапу выполнения практического задания – отработка технологических операций на виртуальном тренажере.

В качестве примера в статье рассмотрен пуск холодильной установки.

Методика отработки операции пуска на тренажере предусматривает следующие действия:

- изучение технологии пуска холодильной установки;
- отработку технологии пуска на виртуальном тренажере;
- самоконтроль степени усвоения;
- аттестацию.

Наиболее существенным в работе тренажера является процесс отработки технологии пуска, который состоит в последовательном включении в работу оборудования холодильной установки. Указанные действия выполняются на тренажере, включающем две схемы: система охлаждения, отвода тепла конденсации (рис. 1) и схема холодильной машины (рис. 2).

Представленная на рис. 1 модель позволяет отрабатывать процедуры подачи холодоносителя насосными станциями Н1, Н2, Н3, а также охлаждающей воды на конденсатор 1К. Правильность выполнения операций контролируется тренажером, а результаты тестирования отражаются в таблице в средней части рисунка.

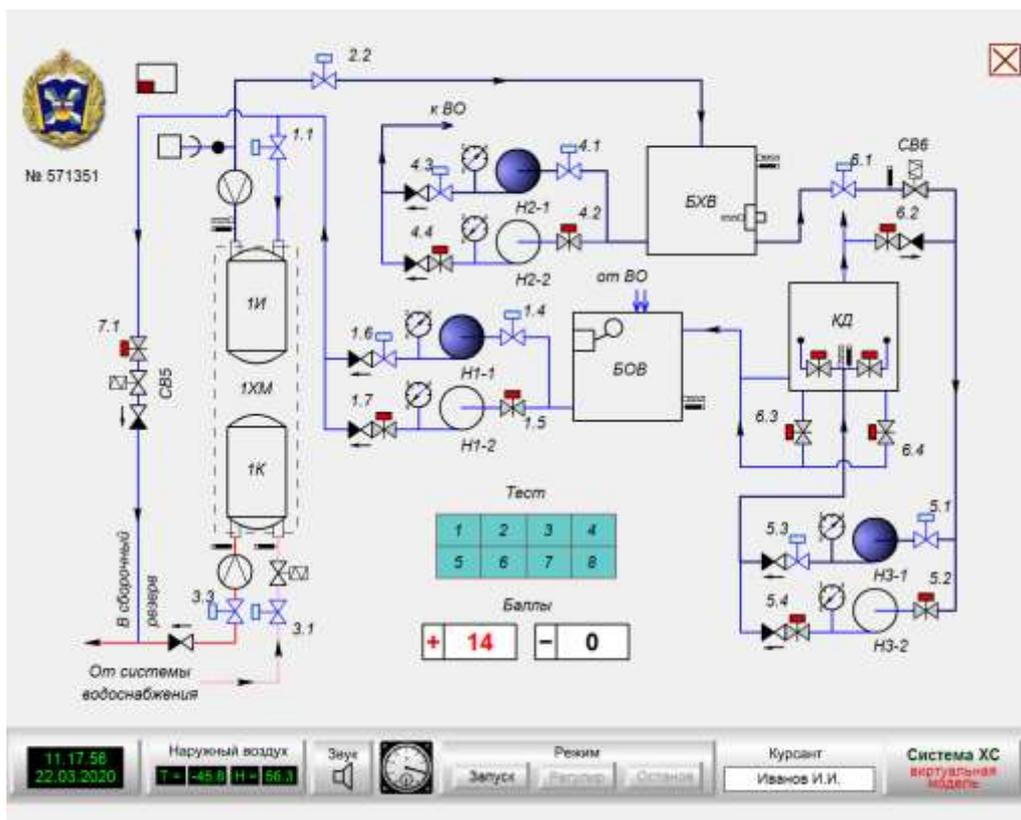


Рис. 1. Принципиальная схема холодильной установки ХМ ФУУ 80

После вывода на рабочий режим систем охлаждения и отвода тепла конденсации производится запуск холодильной машины, модель которой представлена на рис. 2.

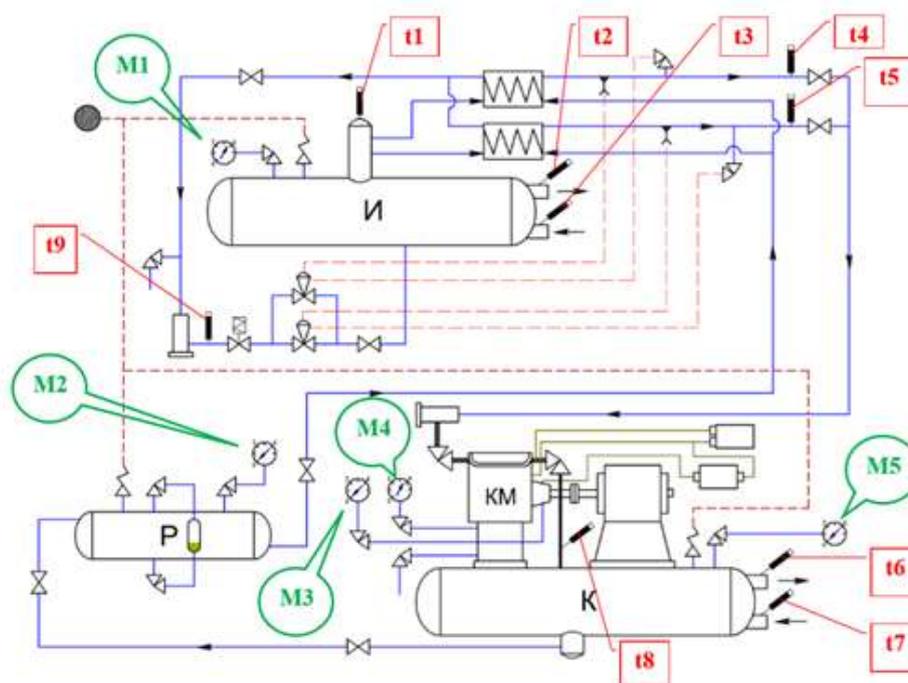


Рис. 2. Принципиальная схема холодильной машины ФУУ 80

Пуск холодильной машины (ХМ) сводится к включению компрессора и выводу машины на режим. Время вывода на режим масштабируется и составляет на тренажере всего 3-4 минуты вместо реального времени – около одного часа. После выхода на режим осуществляется контроль значений параметров ХМ и сопоставление их с допустимыми интервалами параметров, приведенных в справочной таблице.

В результате многократного выполнения процедуры пуска реализуется возможность добиться безошибочного исполнения обрабатываемой задачи. Тренажер позволяет осуществлять самоконтроль и итоговую аттестацию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что для подготовки персонала, эксплуатирующего специальные технические системы уникальных комплексов, целесообразно применять виртуальные тренажерные средства, построенные с помощью *flash*-технологий.

Предложен виртуальный тренажер холодильной установки, позволяющий осуществлять практическую отработку операций пуска, останова холодильной установки и контроль усвоения изучаемого материала.

## Список используемых источников

1. Алексеев Г. В., Бриденко И. И. Опыт и перспективы применения инновационных технологий образования в области пищевых производств: моногр. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 160 с.
2. *Flash*-тренажеры как элемент успешной постановки лабораторного практикума / П. Ф. Баранов [и др.] // Открытое образование. – 2012. – № 5. – С. 30–35.
3. Белов В. В., Образцов И. В. Виртуальные тренажеры в строительном материаловедении и образовании // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Сер. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2016. – № 2(13). – С. 116–121.
4. Долманюк Р. Ю., Демидов П. Г. Актуальность применения в учебном процессе виртуальных тренажеров и интерактивных приложений // Актуальные проблемы практического обучения: материалы Международной методической конференции. – Могилев.: МИМВД, 2014. – С. 77–80.
5. Дудырев Ф. Ф., Максименкова О. В. Симуляторы и тренажеры в профессиональном образовании: педагогические и технологические аспекты // Вопросы образования. – 2020. – № 3. – С. 255–276.
6. Использование виртуальных тренажеров для обучения и повышения квалификации работников заводских лабораторий // Новости образования, 2005. – URL: <http://ct-edu.ru/gnews/cnews/virtualnie-texnicheskie-trenajeri.html> (дата обращения: 14.01.2021).
7. Кануков С. Г., Хатагов А. Ч. Использование энергосберегающих виртуальных тренажеров в процессе подготовки специалистов инженерных специальностей // Информационные ресурсы России. – 2014. – № 1. – С. 27–29.
8. Росляков Е. М., Кулагин А. А., Пудиков В. В. Холодоснабжение специальных объектов: практикум. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. – 154 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Тренажер запуска и останова холодильной машины / Е. М. Росляков, С. Е. Алешичев, И. И. Бриденко, М. А. Макаров. – № 2020615243; опублик. 19.05.2020. – 1 с.

Н. Б. Литвинова,  
*доктор педагогических наук;*  
Ю. Е. Тупицин,  
*кандидат технических наук;*  
Е. В. Шишкин,  
*кандидат технических наук, доцент*

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЕРИОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГИБКИХ СТРАТЕГИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В статье приводится решение задачи определения оптимального по критерию максимума коэффициента оперативной готовности периода проведения технического обслуживания. В качестве модели отказа элемента специальных технических систем рассматриваются две характерные для механического оборудования стадии процесса развития отказа: случайное время возникновения повреждения и время, за которое повреждение перерастает в отказ.

Ключевые слова: техническое обслуживание, коэффициент оперативной готовности, возникновение повреждения, техническое состояние, распределение случайной величины, специальные технические системы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Специальные технические системы (СТС) сооружений специальных объектов предназначены для формирования и поддержания параметров микроклимата в помещениях и выполняют важную роль в обеспечении выполнения целевых задач вооружением, военной техникой и технологическими системами специальных объектов [1].

СТС, включающие в свой состав системы вентиляции и кондиционирования воздуха, системы холодоснабжения, системы оборотного водоснабжения, состоят преимущественно из механического оборудования [1].

Известно, что значительную роль в повышении надежности СТС играет система технической эксплуатации, определяющая периодичность и объемы проведения работ по техническому обслуживанию (ТО) и профилактическому ремонту [2]. При этом теоретические исследования и опыт практического внедрения показывают эффективность применения гибких стратегий обслуживания по фактическому техническому состоянию.

### **МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ОТКАЗА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Анализ причин возникновения отказов механического оборудования показывает, что им предшествует появление повреждения. Например, ослабление резьбовых или других разъемных соединений насосных и вентиляционных агрегатов, образование трещин в пластинах клапанов компрессоров холодильных машин, появление небольшой по объему течи в трубопроводах не сразу приводят к нарушению их работоспособности [3].

Графическое изображение процесса развития отказа элемента представлено на рис. 1, где символом  $t_1$  обозначен интервал времени возникновения повреждения,  $t_2$  – интервал времени, в течение которого повреждение перерастает в отказ,  $t$  – время безотказной работы элемента.

Как показано в [4], между значениями времен возникновения повреждений и второй стадии развития отказа существует весьма слабая статистическая зависимость, которой в прак-

тических расчетах можно пренебречь и считать их статистически независимыми, распределенными по экспоненциальному закону. Принимая во внимание данное допущение, предположим, что время возникновения повреждения и время второй стадии развития отказа механического оборудования СТС подчинены экспоненциальному закону распределения, для которого можно записать следующие выражения для плотности распределения:

$$f_{t_1}(t) = \lambda_1 \exp(-\lambda_1 t); \quad (1)$$

$$f_{t_2}(t) = \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t), \quad (2)$$

где  $\lambda_1$  – интенсивность возникновения повреждений механического оборудования СТС, 1/ч;

$\lambda_2$  – интенсивность развития второй стадии отказа механического оборудования СТС, 1/ч.

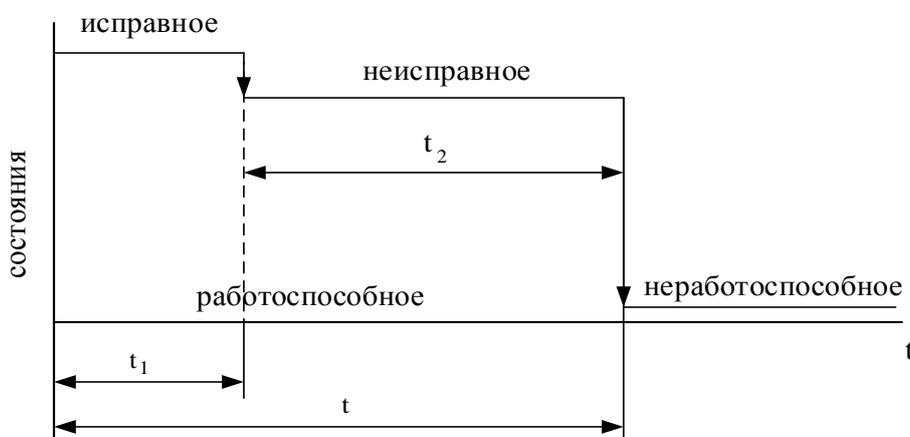


Рис. 1. Графическое изображение процесса развития отказа механического оборудования СТС

Случайное время безотказной работы механического оборудования СТС равно сумме случайных величин  $t_1$  и  $t_2$ , поэтому плотность распределения времени безотказной работы представляет собой свертку функций распределения [5]:

$$f(t) = \int_0^t f_{t_1}(\tau) f_{t_2}(t - \tau) dt. \quad (3)$$

После подстановки выражений (1) и (2) в формулу (3) и выполнения преобразований Лапласа для свертки функций, получим следующее выражение для плотности распределения времени возникновения отказа механического оборудования СТС:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)). \quad (4)$$

После интегрирования (4) можно получить выражение для функции распределения времени возникновения отказа механического оборудования СТС:

$$F_t(t) = 1 - \exp(-\lambda_1 t) - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_1 t)). \quad (5)$$

## МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для вывода зависимости коэффициента оперативной готовности от периодичности выполнения профилактических работ примем следующую последовательность проведения профилактических и аварийных ремонтно-восстановительных работ, характерную для практики эксплуатации СТС.

В начальный период эксплуатации механического оборудования СТС планируется выполнение работ по ТО через некоторый случайный период времени  $\xi$  с функцией распределения  $H_\xi(x)$ . Если отказа механического оборудования СТС за время  $\xi$  не произошло, то в этот момент начинаются профилактические работы продолжительностью  $t_{то}$ , которые полностью обновляют свойства оборудования, характеризующие его техническое состояние.

Если механическое оборудование СТС отказало до назначенного времени проведения ТО  $\xi$ , то сразу после возникновения отказа начинаются внеплановые аварийно-восстановительные ремонтные работы продолжительностью  $t_p$ , которые также полностью восстанавливают свойства оборудования. После проведения ремонтных работ назначаются новые сроки проведения следующих профилактических работ.

Принятую последовательность выполнения профилактических и аварийных работ отражает случайный процесс  $\xi(t)$ , характеризующий состояние механического оборудования в произвольный момент времени:

$$\xi(t) = \begin{cases} S_0, & \text{если в момент } t \text{ механическое оборудование СТС находится в работоспособном состоянии;} \\ S_1, & \text{если в момент } t \text{ производится аварийное восстановление механического оборудования СТС;} \\ S_2, & \text{если в момент } t \text{ выполняются профилактические восстановительные работы на механическом оборудовании СТС.} \end{cases}$$

Процесс  $\xi(t)$  обладает одним важным свойством. Вследствие того, что в моменты перехода процесса в состояние  $S_0$  после выполнения профилактических или аварийных работ механическое оборудование СТС полностью восстанавливает свойства, характеризующие его техническое состояние, и производится перепланирование последующих профилактических работ, то течение процесса в будущем не будет зависеть от прошлого.

Поэтому, моменты перехода процесса в состояние  $S_0$  представляют собой моменты регенерации процесса, а сам процесс  $\xi(t)$  – регенерирующий случайный процесс. Следует отметить, что интервалы времени между моментами регенерации образуют последовательность положительных, одинаково распределенных независимых случайных величин, или образуют процесс восстановления.

## ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОПЕРАТИВНОЙ ГОТОВНОСТИ ОТ ПЕРИОДА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Задача заключается в определении зависимостей коэффициента оперативной готовности от периодов проведения ТО  $\xi$ , распределенных по закону  $H_\xi(t)$ , и нахождении такой функции  $H_\xi(t)$ , при которой достигается экстремальное значение данных показателей.

В [7] для аналогичной последовательности проведения восстановительных работ элемента получено следующее соотношение для коэффициента оперативной готовности:

$$K_{\text{ор}}(t_z) = \frac{\int_0^{\infty} \bar{H}_{\xi}(x) \bar{F}_t(x+t_z) dx}{\int_0^{\infty} \bar{H}_{\xi}(x) \bar{F}_t(x) dx + \bar{\tau}_{\text{ТО}} \int_0^{\infty} \bar{F}_t(x) dH_{\xi}(x) + \bar{\tau}_p \int_0^{\infty} F_t(x) dH_{\xi}(x)}, \quad (6)$$

где  $\bar{\tau}_{\text{ТО}}$  – средняя продолжительность ТО элемента;  
 $\bar{\tau}_p$  – средняя продолжительность аварийных восстановительных работ механического оборудования СТС;  
 $\bar{F}_t(x)$  – дополнительная функция распределения времени безотказной работы механического оборудования СТС,  $\bar{F}_t(x) = 1 - F_t(x)$ ;  
 $\bar{H}_{\xi}(x)$  – дополнительная функция распределения периодичности проведения профилактических работ механического оборудования СТС,  $\bar{H}_{\xi}(x) = 1 - H_{\xi}(x)$ ;  
 $t_z$  – требуемое время безотказной работы механического оборудования СТС.  
 Данное выражение интегрированием по частям преобразуем к виду:

$$K_{\text{ор}}(t_z) = \frac{\int_0^{\infty} A(x) dH_{\xi}(x)}{\int_0^{\infty} B(x) dH_{\xi}(x)} = \frac{\int_0^{\infty} \varphi(x, t_z) dH_{\xi}(x)}{\int_0^{\infty} [\varphi(x, 0) + \bar{\tau}_{\text{ТО}} + (\bar{\tau}_{\text{ТО}} - \bar{\tau}_p) F_t(x)] dH_{\xi}(x)}, \quad (7)$$

где  $\varphi(x, t_z) = \int_{t_z}^{x+t_z} \bar{F}_t(u) du = \int_0^x \bar{F}_t(u+t_z) du$ .

Выражение (8) представляет собой дробно-линейный функционал, экстремальное значение которого целесообразно искать в классе вырожденных функций распределения следующего вида [5]:

$$H_{\xi}(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq t_{\text{ТО}}; \\ 1, & \text{при } x > t_{\text{ТО}}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $t_{\text{ТО}}$  – период выполнения профилактических работ по ТО.

Тогда с учетом (7) выражение (8) можно записать в виде

$$K_{\text{ор}}(t_z) = \frac{\int_0^{t_{\text{ТО}}} \bar{F}_t(x+t_z) dx}{\int_0^{t_{\text{ТО}}} \bar{F}_t(x) dx + \bar{\tau}_{\text{ТО}} + (\bar{\tau}_{\text{ТО}} - \bar{\tau}_p) F_t(t_{\text{ТО}})}. \quad (9)$$

Подставив в (9) выражение для функции распределения времени безотказной работы (5) и проинтегрировав, получим следующее выражение:

$$K_{\text{ор}}(t_{\text{ТО}}) = \frac{a \cdot \exp(-\lambda_2 t_{\text{ТО}}) (1 - \exp(-\lambda_2 t_{\text{ТО}})) - b \cdot \exp(-\lambda_1 t_{\text{ТО}}) (1 - \exp(-\lambda_1 t_{\text{ТО}}))}{a(1 - \exp(-\lambda_2 t_{\text{ТО}})) - b(1 - \exp(-\lambda_1 t_{\text{ТО}})) + \bar{\tau}_{\text{ТО}} + (\bar{\tau}_p + \bar{\tau}_{\text{ТО}}) (1 - \exp(-\lambda_1 t_{\text{ТО}}) - \exp(-\lambda_2 t_{\text{ТО}}))}, \quad (10)$$

где  $a = \frac{\lambda_1}{\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2)}$  и  $b = \frac{\lambda_2}{\lambda_1(\lambda_1 - \lambda_2)}$ .

Очевидно, что при  $t_z = 0$  данное соотношение, согласно определению, будет представлять собой зависимость коэффициента готовности от периодичности проведения ТО.

Выражение (10) удовлетворяет необходимому условию существования экстремума [8], причем максимум  $K_{ор}(t_z)$  достигается при  $t_{то} \neq \infty$ , следовательно, проведение ТО целесообразно.

Зависимости коэффициента оперативной готовности  $K_{ор}(t_z)$  от периода ТО  $t_{то}$  при различных значениях  $\lambda_1, \lambda_2, \bar{t}_{то}, t_z$  представлены на рис. 2.

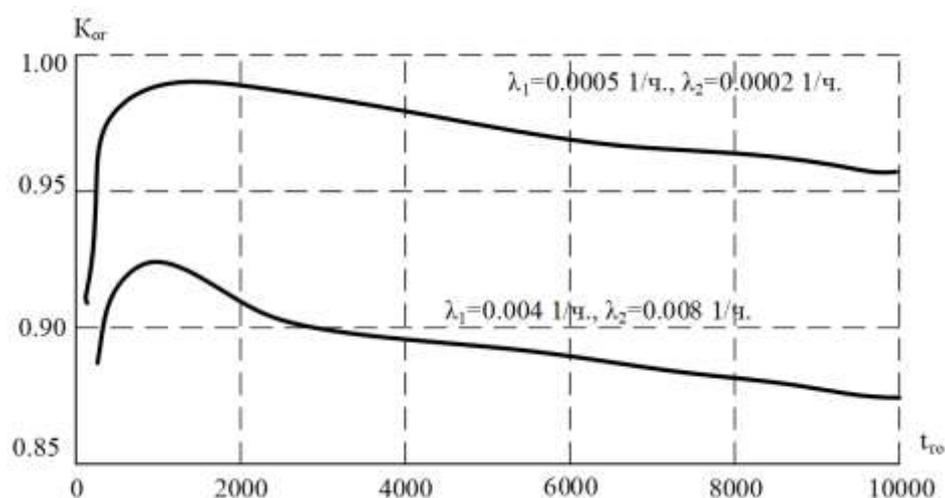


Рис. 2. Зависимость коэффициента оперативной готовности механического оборудования СТС от периода ТО

Определение оптимального периода технического обслуживания элемента СТС, при котором достигается максимум коэффициента оперативной готовности, заключается в решении задачи безусловной оптимизации: дифференцировании выражения (10) по переменной  $t_{то}$  и нахождении корней полученного уравнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные математические зависимости коэффициента оперативной готовности от периода проведения ТО позволяют определять такие периоды проведения профилактических работ, при которых достигаются максимальные показатели готовности механического оборудования СТС.

Для совокупности элементов СТС задача определения перечня элементов, подлежащих профилактическому обслуживанию, решается в виде задачи долгосрочного оптимального планирования, где в качестве целевого функционала принимается максимум коэффициента оперативной готовности СТС при заданных ограничениях в периодах и продолжительности проведения технического обслуживания на интервале планирования.

## Список используемых источников

1. Росляков Е. М. Специальные технические системы: учебник. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2003. – 330 с.
2. Эксплуатация космических средств: учебник / Г. Д. Петров [и др.]; под ред. А. П. Вышинского. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. – 455 с.
3. Авсюкевич Д. А. Технология применения технических систем РКК по назначению: учеб. пособие. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2009. – 74 с.

4. *Дружинин Г. В.* Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 479 с.
5. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович [и др.]; под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
6. *Абрамов О. В., Розенбаум А. Н.* Прогнозирование состояния технических систем. – М.: Наука, 1990. – 125 с.
7. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2004. – 365 с.
8. Надежность систем энергетики и их оборудования: справочник / под общ. ред. Ю. Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 389 с.

И. Н. Некрасов,  
кандидат технических наук;  
В. В. Пудиков,  
кандидат технических наук;  
Е. В. Шишкин,  
кандидат технических наук, доцент

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

В статье представлен алгоритм работы системы автоматического управления (САУ) системами кондиционирования воздуха (СКВ) при реализации энергосберегающих режимов обработки воздуха.

Современные системы автоматизации характеризуются повсеместным применением специальных цифровых вычислительных комплексов на основе использования микро-ЭВМ, программируемых логических контроллеров (ПЛК), что требует совершенствования алгоритмов работы САУ СКВ.

Ключевые слова: системы автоматического управления, система вентиляции и кондиционирования, энергосберегающие режимы обработки воздуха.

### ВВЕДЕНИЕ

Несовершенство управления режимами функционирования СКВ приводит к ситуации, когда имеют место значительные перерасходы энергоресурсов, что влечет за собой необоснованное увеличение стоимости годовой эксплуатации специальных сооружений [1–3].

Для устранения недостатков в управлении СКВ, указанных в [2], необходимо отказаться от традиционно используемых принципов управления и вместо них использовать комбинированный принцип управления «по отклонению и возмущению». Без реализации данного положения энергосбережение в СКВ не осуществимо.

Наиболее эффективным методом реализации энергосбережения при эксплуатации СКВ является применение оптимальных режимов подготовки воздуха перед подачей в рабочую зону [4, 5]. Данный метод требует разработки алгоритма работы САУ СКВ.

Особенности термодинамических моделей обработки воздуха, реализующих оптимальные режимы обработки воздуха, представлены в [4].

В статье рассмотрен алгоритм управления СКВ на основе организации энергосберегающих мероприятий.

### ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

После начала работы САУ СКВ (этап алгоритма 1 на рис. 1) производится сбор информации о требуемых параметрах воздуха в обслуживаемом помещении (объекте) и принятой ранжировке (этап алгоритма 2 на рис. 1). Эти процедуры выполняются оператором в ПЛК.

Получение информации о  $q_{изб}$  и  $w_{изб}$  (этап алгоритма 3 на рис. 1) производится путем сравнения показаний датчиков температуры и влагосодержания на притоке и на удалении. Информация, поступает на ПЛК в результате вычислений по формулам:

$$q_{изб} = m_{П} c_{В} (t_{уд} - t_{пр}) \text{ [кВт/м}^2\text{]},$$

где  $m_{\Pi}$  – расход воздуха, подаваемого в обслуживаемое помещение, кг/(с·м<sup>2</sup>);  
 $c_B$  – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);  
 $t_{уд}$  – температура воздуха, удаляемого из обслуживаемого помещения °С;  
 $t_{пр}$  – температура воздуха, подаваемого в обслуживаемое помещение °С;

$$w_{изб} = m_{\Pi} (d_{уд} - d_{пр}) \text{ [Г/(с·м}^2\text{)]},$$

где  $m_{\Pi}$  – расход приточного воздуха, кг/(с·м<sup>2</sup>);  
 $d_{уд}$  – влагосодержание удаляемого воздуха, г/кг;  
 $d_{пр}$  – влагосодержание приточного воздуха, г/кг.

В работе [2], помимо сбора информации о тепло- и влагоизбытках, предлагается проводить газовый анализ воздуха в помещении с целью определения минимально необходимого расхода наружного воздуха. Для решения этой задачи, помимо датчиков температуры и влагосодержания, необходимо устанавливать газоанализаторы. Их тип (определение концентрации определенного химического вещества) зависит от назначения обслуживаемого помещения.

Информация о термодинамических параметрах наружного воздуха (этап алгоритма 4 на рис. 1) должна поступать от датчиков температуры, влагосодержания и давления.

В случаях, если система воздухопроводов оказывает влияние на термодинамические параметры воздуха (этап алгоритма 5 на рис. 1), следует предусматривать датчики температуры и относительной влажности на воздуховоде 1-й и 2-й рециркуляций. ПЛК, сравнивая информацию от датчиков, установленных на удалении воздуха из помещения, и датчиков, расположенных на воздуховодах 1-й и 2-й рециркуляций, рассчитывает расход воздуха по формулам:

$$q_{R1(R2)} = m_{R1(R2)} c_B (t_{R1(R2)} - t_{уд}) \text{ [кВт/м}^2\text{]},$$

где  $m_{R1(R2)}$  – расход воздуха 1-й (2-й) рециркуляции, кг/(с·м<sup>2</sup>);  
 $t_{R1(R2)}$  – температура воздуха в воздуховоде 1-й (2-й) рециркуляции (непосредственно перед смешиванием), °С;  
 $t_{уд}$  – температура воздуха на воздухозаборе из помещения, °С;  
 $c_B$  – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);

$$w_{R1(R2)} = m_{R1(R2)} (d_{R1(R2)} - d_{уд}) \text{ [Г/(с·м}^2\text{)]},$$

где  $d_{R1(R2)}$  – влагосодержание воздуха в воздуховоде 1-й (2-й) рециркуляции (непосредственно перед смешиванием), г/кг;  
 $d_{уд}$  – влагосодержание воздуха на воздухозаборе из помещения, г/кг.

На основе полученной информации (этапы алгоритма 1–5 на рис. 1) ПЛК проводит вычислительные операции и определяет класс нагрузок (этап алгоритма 6 на рис. 1). Этап алгоритма 6 является наиболее важной из структуры операций. Выполнение данной операции возлагается на ПЛК.

Определение подсистем СКВ, участвующих в работе (этап алгоритма 7 на рис. 1), происходит на основе выбранного класса нагрузок.

В подсистеме нагрева 1-й ступени необходимо предусмотреть защиту от замерзания.

Работу подсистемы увлажнения (этап алгоритма 12 на рис. 1) следует рассматривать в двух режимах: при адиабатном увлажнении и политропном охлаждении. Система регулирования должна вырабатывать сигнал для включения системы холодоснабжения в режимах с потреблением холода. Так же как в подсистеме 1-го нагрева, в подсистеме увлажнения необходимо предусмотреть защиту от замерзания.

Алгоритм работы подсистемы 2-го нагрева (этапы алгоритма 16, 17 на рис. 1) аналогичен алгоритму управления подсистемой 1-го нагрева.



Рис. 1. Структура алгоритма работы САУ СКВ при реализации энергосберегающих мероприятий

Алгоритм работы подсистемы 2-й рециркуляции (этапы алгоритма 18, 15) аналогичен алгоритму работы подсистемы 1-й рециркуляции.

Завершающим этапом алгоритма управления является подача приточного воздуха в рабочую зону (обслуживаемый объект). Блок «*Постоянная времени объекта*» предназначен для проведения переходных процессов, происходящих в СКВ и обслуживаемом объекте (отработка каждой подсистемой СКВ назначенных заданий, приведение всех термодинамических показателей воздуха в помещении к новым значениям). Эта временная составляющая зависит от функционально-технических характеристик оборудования СКВ, средств автоматизации, свойств обслуживаемого объекта, климатических условий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье алгоритм работы САУ СКВ, реализующий энергосберегающие мероприятия, позволяет:

- снизить потребление теплоты, холода и воды, в зависимости от климатического района, на 15-40%;
- создать расширенную функциональную схему системы автоматического регулирования СКВ на основе энергосбережения.

## Список используемых источников

1. *Рымкевич А. А.* Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – СПб.: Арктика, 2003. – 272 с.
2. *Коченков Н. В.* Энергосберегающие режимы систем кондиционирования воздуха: моногр. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2009. – 399 с.
3. *Ковалев Ф. Е., Миргородский А. Н., Эльцов Д. А.* Оптимизация затрат на эксплуатацию объектов наземной космической инфраструктуры // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 675. – С. 288–293.
4. *Пудиков В. В., Жабровец Е. И.* Термодинамическая модель обработки воздуха в прямоточно-рециркуляционных системах кондиционирования воздуха // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 669. – С. 229–235.
5. *Миргородский А. Н., Авсюкевич Д. А., Ниезова С. Е.* Алгоритм решения задачи оптимизации энергопотребления при функционировании систем жизнеобеспечения радиотехнического центра // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 7–13.

Д. А. Авсюкевич,  
*доктор технических наук, профессор;*  
Д. П. Мандрица,  
*кандидат технических наук, доцент*

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

Представлены рекомендации по формированию модели процесса функционирования специальных сооружений с восстановлением. Предлагается оценивание параметров допустимого ущерба и соответствующих им уровней эксплуатационной пригодности по величине допустимого ущерба и риска возникновения аварийных ситуаций. Определены параметры соответствия уровней эксплуатационной пригодности специальных сооружений стартового комплекса допустимому ущербу при возникновении аварийных ситуаций.

Ключевые слова: специальные сооружения, эксплуатационная пригодность, риск, аварийная ситуация.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время, достоверной методики по оценке остаточной прочности и остаточных деформаций после аварийных нагрузок и воздействий не существует, невозможно определить ремонтпригодность поврежденных несущих конструкций специальных сооружений, что безусловно накладывает ограничения на определение времени восстановления специальных сооружений (СС) стартовых комплексов (СК).

Для обеспечения и восстановления эксплуатационной пригодности СС СК в условиях интенсивного воздействия эксплуатационных и особых нагрузок требуется разработка эффективной модели процессов восстановления СС СК. С другой стороны, оценка остаточной прочности и деформаций и, как следствие, остаточного ресурса специальных сооружений с поврежденными (разрушенными) несущими конструкциями становится трудно разрешимой задачей.

Для обеспечения эксплуатационной пригодности СС СК предлагается использовать существующие положения теории надежности и долговечности материалов и конструкций, методы расчета конструкций по предельным состояниям с учетом рисков возникновения аварийных ситуаций. Использование положений представленных теорий позволит:

- 1) продлить остаточный ресурс специальных сооружений СК;
- 2) сдвинуть время наступления отказов специальных сооружений и создать график надежности СС СК, в котором будут указаны границы отказов после аварийных нагрузок и воздействий.

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ**

В общем случае после аварийных нагрузок воздействий оценивается ущерб, причиненный специальным сооружениям. Для оценки параметров ущерба проводится обследование специальных сооружений СК, выполняется комплекс технических мероприятий по восстановлению СС СК. С учетом результатов обследований создается модель процессов восстановления специальных сооружений после аварийных ситуаций, которая представлена на рис. 1.

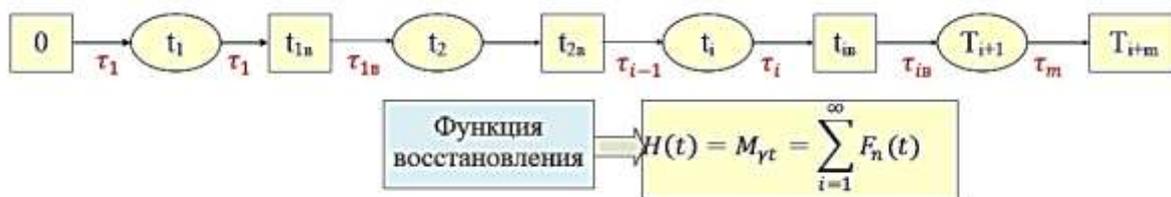


Рис. 1. Модель процессов восстановления СС СК

Обозначим состояния СС СК РКК в момент времени  $t$ : поврежденность –  $D(t)$ , прочность –  $R(t)$  и надежность –  $L(t)$ . Моменты отказов  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m$  образуют процесс, при котором наступают недопустимые значения: поврежденность –  $D_{ult}(t)$ , прочность –  $R_{ult}(t)$  и надежность –  $L_{ult}(t)$ . При возникновении отказа одновременное наступление всех условий практически невозможно:

$$D(t) \geq D_{ult}(t), R(t) \geq R_{ult}(t), L(t) \geq L_{ult}(t).$$

### ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОПУСТИМОГО УЩЕРБА И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ИМ УРОВНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ

В СП 63.13330.2018 под отказами зданий и сооружений понимается появление первого или второго предельных состояний:

- по полной непригодности эксплуатации несущих конструкций;
- затрудняющих нормальную эксплуатацию конструкций или уменьшающих долговечность зданий и сооружений по сравнению с предусмотренным сроком службы.

Функция надежности  $L(t)$  для стартовых сооружений СК может быть представлена следующим выражением:

$$L(t) \equiv P(T > t),$$

где  $T$  – срок службы сооружения.

Функция надежности может быть выражена через функцию риска  $h(\tau)$ :

$$L_T(t) = L_T(0) \exp \left[ - \int_0^t h(\tau) d\tau \right].$$

Применение риска для стартовых сооружений обусловлено необходимостью оценки вероятного ущерба от аварийной ситуации. Важное значение имеет прогнозирование зон рисков: недопустимого риска, зоны повышенного риска, зоны условно приемлемого риска и зоны приемлемого риска.

С учетом представленных зависимостей функция риска представляется выражением

$$h(\tau) d\tau = P[\tau < T \leq \tau + \Delta\tau].$$

Для заданного времени  $t_1$  получим

$$L_T(t) = L_T(t_1) \exp \left[ - \int_{t_1}^t h(\tau) d\tau \right].$$

Обозначим повреждения:  $D_1(t)$  – в течение эксплуатационного периода за время  $t$ ;  $D_2(t)$  – после аварийного воздействия (после аварийного запуска РКН);  $D_{ост}(t)$  – остаточная поврежденность после восстановления.

Условия наступления первого и второго предельных состояний имеют вид

$$F \leq F_{ult}, N \leq N_{ult}, \dots, f \leq f_{ult}, a_{crc} \leq a_{crc,ult}.$$

Преобразуя выражения в безразмерные характеристики (критерии) наступления предельных состояний получаем

$$\frac{F}{F_{ult}} \leq 1, \frac{N}{N_{ult}} \leq, \dots \frac{f}{f_{ult}} \leq 1, \frac{a_{crc}}{a_{crc,ult}} \leq 1$$

В работах [3, 4] принята граничная зависимость размера материального ущерба от частоты возникновения чрезвычайных ситуаций (рис. 2).

Частота чрезвычайных ситуаций	Размер материального ущерба, руб.			
	$\leq 1 \cdot 10^5$ тыс.	$1 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^7$ тыс.	$5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8$ тыс.	$\geq 5 \cdot 10^8$ млн.
$\geq 1$	Зона недопустимого риска			
$1 - 10^{-1}$				
$10^{-1} - 10^{-2}$	Зона повышенного риска			
$10^{-2} - 10^{-3}$				
$10^{-3} - 10^{-5}$	Зона условно приемлемого риска			
$10^{-5} - 10^{-6}$				
$10^{-5} - 10^{-6}$	Зона приемлемого риска			
$10^{-6} - 10^{-6}$				
$\leq 1 \cdot 10^{-6}$				

Рис. 2. Размер общего материального ущерба на СК

Рассмотрим два периода эксплуатации специальных сооружений СК РКК: период повседневной деятельности и период нарастания угрозы агрессии.

Общее время эксплуатации  $T$ , соответствующее общему количеству запусков РКН –  $n$ .

Пусть стартовому сооружению на время  $t$  соответствует надежность  $L(t) = P(T > t)$ . Тогда надежность стартового сооружения по отношению к начальному времени можно описать зависимостью

$$L_T(t) = L_T(0) \exp \left[ - \int_0^t h(\tau) d\tau \right].$$

Выразим риск возникновения аварийной ситуации на этом промежутке времени  $t$ :

$$\int_0^t h(\tau) d\tau = \ln \left[ \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \right].$$

Преобразуем

$$h(\tau) = \frac{L_T(0) \cdot \frac{d(L_T(t))}{dt}}{\ln \left[ \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \right]^2 L_T(t)} + h_0(\tau).$$

Здесь  $h_0(t)$  начальный (фиксированный) риск возникновения аварийной ситуации на стартовом комплексе. Выразим функцию риска на каждый промежуток времени, соответствующий запуску РКН. Тогда на момент времени 1-го пуска

$$h_1(\tau_{1 \text{ пуск}}) = P_{(1 \text{ пуск})} \cdot C_{(t, 1 \text{ пуск})}.$$

Здесь  $C_{i,(1 \text{ пуск})} = C_{i,ав.} + C_{i,экс.}$   $C_{ав.}$  – ущерб, полученный стартовым сооружением в случае возникновения аварийной ситуации на стартовом комплексе и ущерба в ходе нормальной эксплуатации на момент времени  $t$ .

Соответственно на момент времени 2-го пуска

$$h_1(\tau_{2 \text{ пуск}}) = P_{(2 \text{ пуск})} \cdot C_{(t, 2 \text{ пуск})}.$$

Соответственно на момент времени  $n$ -го пуска

$$h_1(\tau_{n \text{ пуск}}) = P_{(n \text{ пуск})} \cdot C_{(t, n \text{ пуск})}.$$

Значение вероятности возникновения аварийной ситуации  $P_{(n \text{ пуск})}$  определяется на основе методов, изложенных в [1, 2]. Необходимо отметить, что на величину вероятности возникновения аварийной ситуации  $P_{(n \text{ пуск})}$  будут влиять следующие показатели:

– количество безаварийных пусков на момент времени оценки вероятности безаварийной работы;

– время безаварийной работы с начала эксплуатации;

– уровень поврежденностей стартового сооружения на момент времени  $i$ -го пуска.

Тогда с учетом представленных положений вероятность возникновения аварийной ситуации определяется выражением

$$P_{(n \text{ пуск})} = P_{(\text{РКН})} \cdot \frac{n_{\text{ав.}}(t)}{n(t)} \cdot \frac{d_i}{d_{\text{ult}}}.$$

Здесь  $d_i$  – нормативное значение поврежденностей, которое принимает следующие значения:  $d_a$  – допустимый уровень поврежденностей несущих конструкций и  $d_{\text{ult}}$  – предельный уровень поврежденностей несущих конструкций.

При условии  $d_i = d_a$ , допустимый уровень риска возникновения аварийной ситуации будет составлять

$$P_{(n \text{ пуск}), \text{ult}} = P_{(\text{РКН})} \cdot \frac{n_{\text{ав.}}(t)}{n(t)} \cdot \frac{d_a}{d_{\text{ult}}}.$$

Уровень ущерба составит

$$C_{(t, n \text{ пуск}), i} = \frac{n(t)}{P_{(\text{РКН})} \cdot n_{\text{ав.}}(t)} \cdot \frac{d_{\text{ult}}}{d_i} \cdot \frac{L_T(0) \cdot \frac{d(L_T(t))}{dt}}{\ln \left[ \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \right]^2 L_T(t)} + h_0(\tau).$$

С учетом полученных значений для рисков  $P_{(n \text{ пуск}), \text{ult}}$  допустимый уровень ущерба  $C_{(t, n \text{ пуск}), \text{ult}}$  будет равен

$$C_{(t, n \text{ пуск}), a} = \frac{n(t)}{P_{(\text{РКН})} \cdot n_{\text{ав.}}(t)} \cdot \frac{d_{\text{ult}}}{d_a} \cdot \frac{L_T(0) \cdot \frac{d(L_T(t))}{dt}}{\ln \left[ \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \right]^2 L_T(t)} + h_0(\tau).$$

На момент времени обследования  $t_0$  выражение для предельного ущерба на  $n$ -й пуск составит

$$C_{(t, n \text{ пуск}), \text{ult}} = \frac{n_{\text{ав.}}(t) \cdot d_{\text{ult}}}{n(t) \cdot d_a \cdot P_{(\text{РКН})}} \cdot \left( \frac{L_T(0) \cdot \frac{d(L_T(t))}{dt}}{\ln \left[ \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \right]^2 L_T(t)} + h_0(\tau) \right).$$

Примем отношение допустимых повреждений к предельным за относительную величину поврежденностей  $d_{a, \text{отн}}$ , а отношение количества аварийных запусков к общему количеству запусков –  $P_{t, \text{ав}}$ . Уравнение для  $C_{(t, n \text{ пуск}), \text{ult}}$  примет вид

$$C_{(t, n \text{ пуск}), \text{ult}} = \frac{d_{a, \text{отн}} \cdot P_{t, \text{ав}}}{P_{(\text{РКН})}} \cdot \left( \frac{L_T(0) \cdot \frac{d(L_T(t))}{dt}}{\ln \left[ \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \right]^2 L_T(t)} + h_0(\tau) \right).$$

Величина допускаемого риска возникновения АС по величине материального совокупного ущерба с учетом величины материального ущерба (см. рис. 2) представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Уровни допускаемого риска возникновения АС  
по величине материального (совокупного) ущерба**

Категория тяжести ущерба	1 - пренебреж малая	2 – некритичная			3 – критичная				4 – катастрофическая
		2 а	2б	2 в	3а	3б	3в	3д	
Ущерб (СС СК граждан. назначения)	Снижение качества функционирования	Перенос пуска на 1 сутки	Повреждение оборудования, устраняемое последующими ремонтно-восстановительными работами	Кратковременное превышение допустимых воздействий на персонал и окружающую среду	Повреждение ракеты космического назначения с ее отказом в полете	Ущерб для окружающей среды, требующий реабилитационных работ	Разрушение оборудования комплекса, требующего длительного внепланового ремонта	Ущерб для других объектов космодрома, требующих их длительного ремонта	Разрушение оборудования комплекса, требующего длительного внепланового ремонта
	<b>0.1</b>		<b>0.05</b>	<b>0.03</b>		<b>0.001</b>			<b>0.00001</b>
Ущерб СС СК военного назначения	Перенос пуска на 1 сутки	Повреждение несущих конструкций СС СК, устраняемое в угрожаемый период 1 уровень ЭП	Повреждение несущих конструкций СС СК, устраняемое в угрожаемый период 1 уровень ЭП	Повреждение несущих конструкций СС СК, требующих предварительного усиления 2 уровень ЭП	---	2 уровень ЭП	---	2 уровень ЭП	---
									3 уровень ЭП

Исходя из уровней ущерба специального сооружения, функция допустимого риска возникновения аварийной ситуации примет вид

$$h_1(\tau_{\text{доп}}) = P_{(\text{доп})} \cdot \left[ \frac{n(t)}{P_{(\text{РКН})} \cdot n_{\text{ав.}}(t)} \cdot \frac{d_{\text{ult}}}{d_i} \cdot \frac{L_T(0) \cdot \frac{d(L_T(t))}{dt}}{\ln \left[ \frac{L_T(0)}{L_T(t)} \right]^2 L_T(t)} \right] + h_0(\tau).$$

В качестве показателя эффективности предложенного метода восстановления стартовых сооружений после аварийных ситуаций на СК РКК может быть выбрана величина относительного снижения риска за счет инженерно-технических мероприятий по обеспечению безопасности и допустимости повреждений на стартовом комплексе [2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования уровней ущерба и допустимого риска возникновения аварийной ситуации на стартовом комплексе позволили:

- разработать модель процессов восстановления специальных сооружений после аварийных ситуаций;
- получить достоверные оценки моментов наступления отказов стартовых сооружений по величине рисков возникновения аварийных ситуаций;
- оперативно разделять уровни эксплуатационной пригодности по величине риска возникновения аварийных ситуаций;
- планировать технические мероприятия по объему восстановительных работ и времени восстановления.

### Список используемых источников

1. Мельчаков А. П. Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов (Теория, методики и инженерные приложения): учеб. пособие. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 49 с.
2. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / А. Г. Тамразян [и др.]; под общ. ред. А. Г. Тамразяна. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 304 с.
3. ГОСТ 54317–2011. Комплексы стартовые и технические ракетно-космических комплексов. Требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2011. – 27 с.
4. ГОСТР 58781–2019. Ракетно-космическая техника. Система менеджмента качества. Управление рисками при обеспечении качества изделий ракетно-космической техники. – М.: Стандартиформ, 2019. – 36 с.

С. Е. Алешичев,  
кандидат технических наук, доцент;  
Д. С. Старчуков,  
кандидат технических наук, доцент;  
А. М. Сычева,  
доктор технических наук, доцент

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ БЕТОННОГО ОБРАЗЦА В МОНОЛИТНОЙ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ОБОЙМЕ

В работе предложена математическая модель, учитывающая два механизма упрочнения бетона при пропитке его поверхности золей  $\text{SiO}_2$ . Это физико-химический механизм упрочнения цементного камня в поверхности бетона частицами вносимого золя и механизм механического упрочнения образовавшимся сверхпрочным монокристаллическим поверхностным слоем (обоймой) неупрочненного бетонного ядра при действии нагрузки.

Ключевые слова: бетон, обойма, поверхностная энергия, золь.

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день хорошо известно практическое применение добавок на основе наноразмера для повышения качества бетона и цементных растворов. При оценке активирующего действия таких добавок учитываются их химическая природа, а также размер вводимых частиц. Но при этом не производится количественная оценка вводимой в систему избыточной поверхностной энергии, которая при грамотном ее использовании совместно с химической энергией таких частиц может значительно повысить коэффициент полезного действия процесса активирования. Этот эффект будет заключаться в более полном превращении одного вида энергии в другой – избыточной поверхностной энергии наночастиц в механическую энергию (прочность, твердость и т. д.) образующихся новых твердых фаз в цементном камне.

В предыдущих исследованиях авторов рассмотрен вопрос повышения физико-механических свойств бетона при его пропитке золями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Исследованы условия пропитки, время выдержки образцов бетона в растворах зольей, время последующей выдержки с целью получения максимального эффективного повышения качества бетона.

В результате проведенного теоретического и экспериментального анализа научно обосновано два механизма упрочнения бетонного образца при его пропитке зольсодержащими растворами [1].

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Математическое описание первого механизма – физико-химического упрочнения поверхностного слоя бетона выражается формулой

$$R = 0,01E_{\text{пр}}^3 - 0,6E_{\text{пр}}^2 + 9E_{\text{пр}} + 48,25. \quad (1)$$

Оно учитывает дополнительную поверхностную энергию  $E_{\text{пов}}$ , которая поступает в цементную систему вместе с наночастицами зольей [2, 3]. Эта энергия активирует процессы гидратации цемента в поверхностном слое, в результате чего образуется высокопрочный монокристаллический слой – обойма. Поверхностная энергия выражена в зависимости в виде безраз-

мерной величины  $E_{пр}$ , зависимость получена на основе проведенных экспериментальных данных.

Второй механизм упрочнения – механическое упрочнение бетона в случае действия нагрузки сверхпрочным монолитным слоем (обоймой), полученным в результате его пропитки золями, выражено формулой, так же полученной по экспериментальным данным:

$$R_{сж} = (0,35R_{обоймы} + 0,65R_{ядра}) \cdot k_{ф} \cdot n \cdot 1,2(h/a)^{-0,3}, \quad (2)$$

где  $k_{ф}$  – коэффициент, учитывающий форму сечения образца: если куб со стороной 100 мм, то  $k_{ф} = 1$ , если цилиндр, то  $k_{ф} = 1,15$ ;

$n$  – число модифицированных граней: если шесть граней, то  $n = 1,6$ , если четыре грани (боковые), то  $n = 1,5$ , если две грани (верхняя и нижняя), то  $n = 1,4$ ;

$h/a$  – отношение высоты образца к его ширине.

Зависимость (2) учитывает влияние на прочность при сжатии образца, заключенного в обойму, следующих факторов: перераспределения нагрузки между обоймой и бетонным ядром, количества золированных граней, формы сечения образца, а также расстояния между верхней и нижней золированными гранями.

Основная идея работы заключается в том, что можно создать единую математическую модель упрочнения, объединяющую оба этих механизма с использованием математического аппарата регрессионного анализа.

В работе предлагается реализовать эту идею следующим образом. Поскольку определение прочности полученного в результате пропитки золем поверхностного слоя бетона (обоймы) затруднено – неразрушающие методы контроля дают большую погрешность, а другие методы определения прочности не применимы, то прочность обоймы  $R_{обоймы}$  получена путем ее выражения из формулы (2) без учета коэффициентов  $k_{ф} \cdot n$  и  $h/a$ . Коэффициенты в данном случае не учитываются, поскольку сам эффект механического упрочнения бетонного ядра монолитной обоймой заключается в перераспределении усилий между ними при действии нагрузки.

На основе экспериментальных данных (табл. 1), полученных при проведении исследований образца на прочность после пропитки золем  $SiO_2$ , получена математическая зависимость прочности модифицированного бетонного образца при сжатии  $R$  (МПа) от величины приведенной поверхностной энергии вносимых при модифицировании бетона наночастиц золь и от величины прочности неупрочненного золем бетонного ядра  $R_{я}$  (рис. 1):

$$R_{сж \text{ расч.}} = 0,0111 \cdot E_{пр.}^3 - 0,6453 \cdot E_{пр.}^2 + 8,9862 \cdot E_{пр.} + 0,2216 \cdot R_{я} + 32,8546, \quad (3)$$

где  $R_{сж \text{ расч.}}$  – расчетная прочность модифицированного бетонного образца при сжатии, МПа;

$E_{пр}$  – приведенная поверхностная энергия,  $\cdot 10^{-5}$ ;

$R_{я}$  – прочность неупрочненного бетонного ядра, МПа.

Вопрос применимости полученной модели решен на основании проверки ее адекватности, проведенной по критерию Фишера ( $F$ ), которая подтвердила статистическую значимость модели для значения доверительной вероятности  $\beta = 95\%$  (уровень значимости  $\alpha = 0,05$  или  $5\%$ ) при изменении параметров в пределах границ экспериментальных исследований:  $0,22 \cdot 10^{-5} < E_{пр} < 36,0 \cdot 10^{-5}$ ;  $73,0 < R_{я} < 83,0$  (МПа) [4, 5]:

$$F_{расч} = 31,5974 > F_{крит} = 3,4780. \quad (4)$$

Таблица 1

## Статистический ряд экспериментальных значений прочности бетона при сжатии

№ п/п	$E^3$	$E^2$	$E, (*10^{-5})$	$R_{я}, \text{МПа}$	$R_{сж \text{ эксп.}}, \text{Па}$
1	0,01	0,05	0,22	73,00	51,06
2	0,01	0,05	0,22	78,00	52,10
3	0,01	0,05	0,22	83,00	53,14
4	46656,00	1296,00	36,00	73,00	54,19
5	46656,00	1296,00	36,00	78,00	55,30
6	46656,00	1296,00	36,00	83,00	56,41
7	5832,00	324,00	18,00	73,00	64,09
8	5832,00	324,00	18,00	78,00	65,40
9	5832,00	324,00	18,00	83,00	66,71
10	91,13	20,25	4,50	73,00	69,78
11	91,13	20,25	4,50	78,00	71,20
12	91,13	20,25	4,50	83,00	72,62
13	729,00	81,00	9,00	73,00	88,40
14	729,00	81,00	9,00	78,00	90,20
15	729,00	81,00	9,00	83,00	92,00

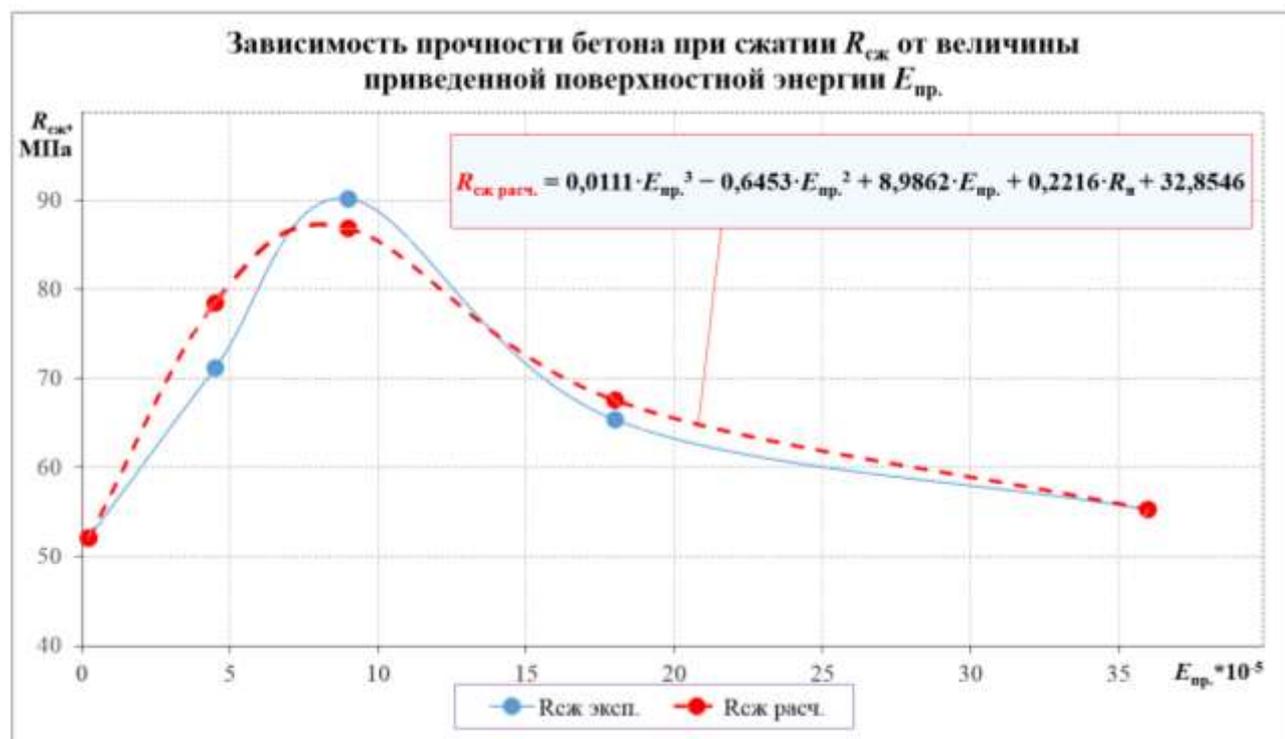


Рис 1. Зависимость прочности при сжатии бетона  $R_{сж}$  от величины вносимой поверхностной энергии  $E_{пр}$  и прочности бетонного ядра

Расчетное значение  $F_{\text{расч}}$  превышает критическое значение  $F_{\text{крит}}$  для соответствующих степеней свободы, следовательно, модель адекватна.

При этом средняя ошибка аппроксимации, определяемая по формуле:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{R_{\text{сж.эксп. } i} - R_{\text{сж.расч. } i}}{R_{\text{сж.эксп. } i}} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

составляет  $A = 3,48\%$ , что свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным, поскольку значение  $A$  не превышает допустимого предела (10%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые удалось объединить два различных механизма упрочнения бетона – физико-химического и механического, реализующихся при пропитке его поверхности различными золями, в одну математическую зависимость. В результате получена формула, связывающая прочность при сжатии всего бетонного образца с прочностью неупрочненного бетонного ядра, а также с физико-химической величиной, во многом определяющей активирующий по отношению к цементу эффект от вводимых золь – поверхностной энергией вводимых наночастиц.

Проверка применимости, полученной с помощью регрессионного анализа математической зависимости, показала, что она адекватна и хорошо описывает экспериментальные данные.

## Список используемых источников

1. Метод поверхностного упрочнения бетонов для сооружений специального назначения / А. М. Сычева [и др.]. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. – 74 с.
2. Сычев М. М. Неорганические клеи. – Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1986. – 152 с.
3. Инженерные физико-химические основы управления качеством бетона: моногр. / Д. С. Старчуков [и др.]. – СПб.: ПГУПС, 2015. – 88 с.
4. Математическое описание процесса получения неорганической монолитной обоймы за счет поверхностного упрочнения бетона золированием / А. М. Сычева [и др.] // Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 9. – С. 32–33.
5. Балюбаи В. А., Алешичев С. Е. Исследование и практика определения (расчета) состава многокомпонентных смесей // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – № 3. – С. 164–171.

А. А. Буслов\*,

*кандидат военных наук, доцент;*

Н. Н. Гусев\*\*,

*доктор технических наук, профессор;*

А. О. Кучеренко\*\*

\*НИЦ РЭВ ФИР ВМФ НИИ ОСИС ВУНЦ ВМА имени Н. Г. Кузнецова,

г. Санкт-Петербург, г. Пушкин.

\*\*Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

## МЕТОД КОРРЕКТИРОВКИ АМПЛИТУДНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКТОВ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Статья посвящена актуальной проблеме, связанной с повышением помехоустойчивости и надежности систем мониторинга технического состояния специальных сооружений, построенных с использованием в качестве первичных преобразователей частотных (струнных) преобразователей с импульсным способом возбуждения. Предложенные в статье решения направлены на обеспечение максимального соотношения «сигнал/шум» на выходе первичных преобразователей. В статье проанализировано влияние амплитуды импульса силы возбуждения колебаний струнного резонатора первичного преобразователя систем испытаний и длительного контроля на амплитуду его колебаний. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что для обеспечения поддержания относительной погрешности измерения частоты колебаний резонатора на постоянном уровне на всем интервале измерения струнных преобразователей, необходимо, чтобы амплитуда импульса возбуждения поддерживалась прямо пропорционально кубу ее частоты. Представлены результаты экспериментов, показывающих влияние амплитуды импульсов возбуждения на амплитуду колебаний струнного резонатора, а, следовательно, и амплитудную погрешность измерения. Проанализированы и даны объяснения различиям в экспериментальных и теоретических данных, выдвинуты гипотезы, объясняющие эти различия. Предложены конкретные пути повышения надежности систем мониторинга технического состояния специальных сооружений на базе струнных преобразователей с импульсным способом возбуждения, подкрепленные патентами на изобретения.

Ключевые слова: системы контроля технического состояния, мониторинг, специальное сооружение, первичный струнный преобразователь, амплитуда импульса силы, амплитуда колебания струны, напряженно-деформированное состояние, вторичная аппаратура.

### ВВЕДЕНИЕ

Системы мониторинга технического состояния (СМТС) специальных сооружений (СС) – комплекс технических средств, предназначенных для контроля основных параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций (НК) СС на протяжении всего их жизненного цикла. Основные параметры НДС НК СС контролируются тензометрическими комплектами (ТК) СМТС СС. Основными компонентами ТК СМТС СС являются: первичные струнные преобразователи (СП), как правило, с импульсным способом возбуждения; блок коммутации (БК); вторичная аппаратура (ВА), обеспечивающая возбуждение колебаний струнных резонаторов СП, усиление и преобразование их выходных сигналов, а также кабели для контрольно-измерительной аппаратуры (ККИА), соединяющие элементы ТК [1].

Используемая в ТК СМТС СС зависимость между физическими параметрами колебания струны (частотой  $\omega$  (или периодом  $T$ ) колебания и амплитудой) от напряжения растяжения струны и параметрами импульсов возбуждения этих колебаний ( $F$  – амплитуды,  $Q_n$  – фазы и длительности  $\tau_n$ ) достаточно полно освещена в специальной литературе [1].

## МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕЗОНАТОРОВ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКТОВ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

При возбуждении колебаний СП импульсным способом основной задачей является обеспечение значения амплитуды затухающих колебаний струны в пределах от  $y_{\max}$  до  $y_{\min}$  на всем интервале измерения ( $t_{\text{изм}}$ ). Возбуждение колебаний струны осуществляется посредством электромагнитного импульса, генерируемого в электромагнитных катушках возбуждения (ЭКВ) с амплитудой  $F$  и длительностью  $\tau_{\text{и}}$ . Сформированный импульс силы возбуждает затухающие колебания струны  $y$ , которые в свою очередь наводят в ЭКВ ЭДС  $e$ . Информативным параметром СП являются частота  $\omega$  или период  $T$ , по которым судят о величине измеряемого параметра НДС. Однако измерять амплитуду  $e$  можно только до некоторого наперед заданного значения, определяемого уровнем помех, соответствующего минимально допустимому значению амплитуды колебания струны  $y_{\min}$  [1].

Конструктивные особенности СП не позволяют возбуждать колебания струны с амплитудой  $y_{\max}$ , превышающей значение конструктивного зазора  $\delta_0^k$  между керном ЭКВ и струной в невозбужденном состоянии. Следовательно, оптимальным режимом возбуждения колебаний струнного резонатора СП ТК СМТС является такой, при котором обеспечивается значение амплитуды затухающих колебания струны в пределах от  $y_{\max}$  до  $y_{\min}$  на всем интервале измерения. Основной погрешностью струнного метода измерения является амплитудная погрешность [1–3], следовательно, для ее минимизации необходимо обеспечить выполнение условия  $y_{\max} - y_{\min} \rightarrow 0$ .

Для обеспечения непрерывного колебания струны генерация очередного импульса возбуждения должны выполняться два условия. Первое – генерация очередного импульса возбуждения должна происходить с периодом  $T_0$ , значение которого должно быть меньше времени  $T^*$  затухания амплитуды колебаний, до значения  $y_{\min}$  (рис. 1); второе – импульс возбуждения должен быть синхронизирован с моментом перехода колебания струны через ноль, т. е. с минимальным сдвигом по фазе колебания струны.

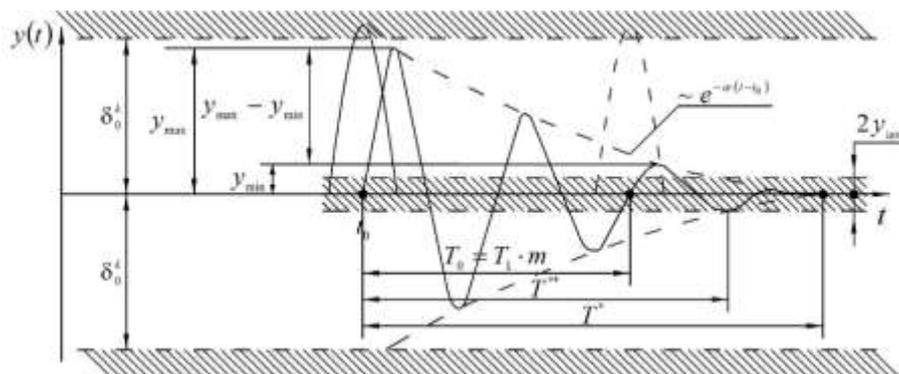


Рис. 1. Импульсный способ возбуждения колебаний струны СП

В современной практике проектирования ВА с импульсным способом возбуждения применяются импульсы силы прямоугольной формы и постоянной амплитуды [1, 2]. Такие параметры импульса возбуждения неизбежно приводят к возбуждению высших гармоник, что в связи с чем снижаются помехоустойчивость СМТС и амплитудная погрешность измерения параметров НДС СС [3]. Проведенные авторами теоретические и экспериментальные исследования показали влияния формы импульса силы, возбуждающего колебания струны, на амплитуду ее колебаний [4] и установили, что оптимальной формой импульса возбуждения является форма, максимально приближенная к полусинусоиде (рис. 2) [5].

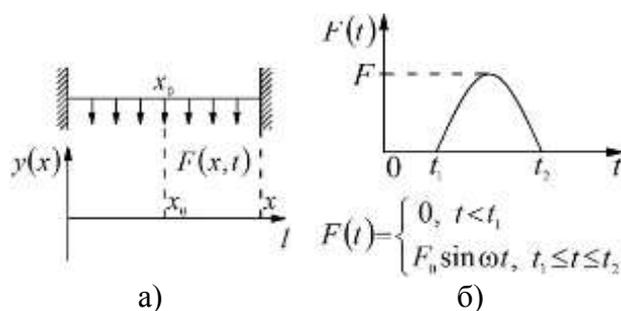


Рис. 2. Импульс силы в форме полусинусоиды во времени:  
 а – точка приложения импульса силы  $F(x, t)$ ; б – амплитуда силы

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕКТИРОВКИ АМПЛИТУДНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СТРУННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКТОВ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

При проведении эксперимента учитывались два факта [3].

Во-первых, зависимость частоты струны от таких факторов, как  $f$  – собственная частота поперечных колебаний струны и напряжения  $\sigma_0$  в ней, определенные для линейной системы, т. е. при бесконечно малой амплитуде колебаний струны  $y_0'$ ;  $f_y$  – собственная частота поперечных колебаний струны с учетом амплитуды колебаний  $y_1$  основного тона ( $n = 1$ );  $E$  – модуль упругости материала струны;  $l$  – длина струны. Причем  $f_y$  собственная частота поперечных колебаний струны с учетом амплитуды колебаний  $y_1$  основного тона имеет квадратичную зависимость от  $y_1$ .

Во-вторых, относительная погрешность определения частоты колебаний струны, вызванной амплитудой ее колебаний, также имеет квадратичную зависимость от  $y_1$  [3].

В свою очередь, амплитуда колебаний струны является функцией амплитуды импульса возбуждения  $F$  [3].

Следовательно, амплитуда колебаний струны одновременно является функцией амплитуды импульса возбуждения  $F$  и частоты колебаний струны  $\omega_n$ , которая в свою очередь зависит от амплитуды колебания струны. Принимая во внимание зависимость относительной погрешности определения частоты колебаний струны от амплитуды ее колебаний, получаем, что для поддержания относительной погрешности измерения частоты колебаний струны на постоянном уровне на всем интервале измерения СП необходимо, чтобы амплитуда импульса возбуждения  $F$  удовлетворяла требованию:

$$F = K \cdot f^3 \sqrt{\delta_f}, \quad (1)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент, характеризующийся параметрами датчика;

$f$  – частота колебаний струны;

$\delta_f$  – относительная погрешность по частоте.

Для серийно выпускаемых СП при изменении измеряемого параметра НДС  $P$  от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$  информативный параметр СП (частота) изменяется в диапазоне от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ , что для СП типа ПСАС-40 составляет 1200–2000 Гц, а ПСАС-40М – 800–2200 Гц.

Для удовлетворения требования (1) при изменении измеряемого параметра НДС  $P$  от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$  амплитуда импульса возбуждения должна измениться для СП типа ПСАС-40 в 3,5 раза,

а ПСАС-40М – в 18,1 раза. Теоретические зависимости  $F(f)$  в рабочем диапазоне частот СП типа ПСАС-40 и ПСАС-40М представлены на рис. 3.

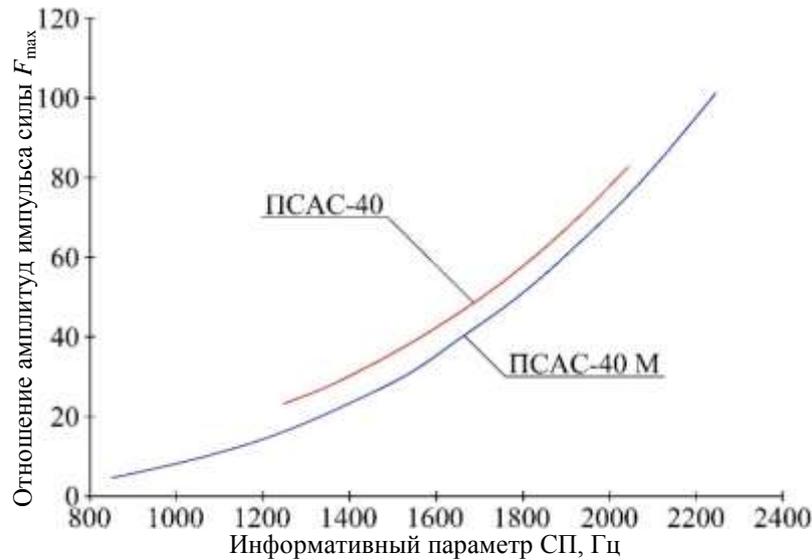


Рис. 3. Теоретические зависимости  $F(f)$  в рабочем диапазоне частот СП

Такой диапазон изменения частоты колебаний струны накладывает ограничения на амплитуду импульса силы, так как одновременно должно соблюдаться условие  $y_{\max} > y > y_{\min}$ . Значение  $y_{\max}$  ограничено конструктивным зазором  $\delta_0^k$ , а  $y_{\min}$  – уровнем помех.

Контролировать параметры  $y_{\max}$  и  $y_{\min}$  в герметизированном СП практически не представляется возможным. Поэтому на практике контролируется значение  $e$ , которое в первом приближении определяется из выражения [6]:

$$e_{\text{эдс}} = 4N^B \cdot f_y \cdot B_0 \cdot S_m \cdot y / \delta_0^k, \quad (2)$$

где  $N^B$  – число витков в ЭКВ;

$B_0$  – индукция магнитного поля;

$S_m$  – площадь, перекрываемая струной и полюсом электромагнита;

$y$  – прогиб струны в точке  $x = x_0$  (см. рис. 2,а).

Экспериментальные зависимости  $F(f)$  в рабочем диапазоне частот СП типа ПСАС-40 и ПСАС-40М представлены на рис. 4.

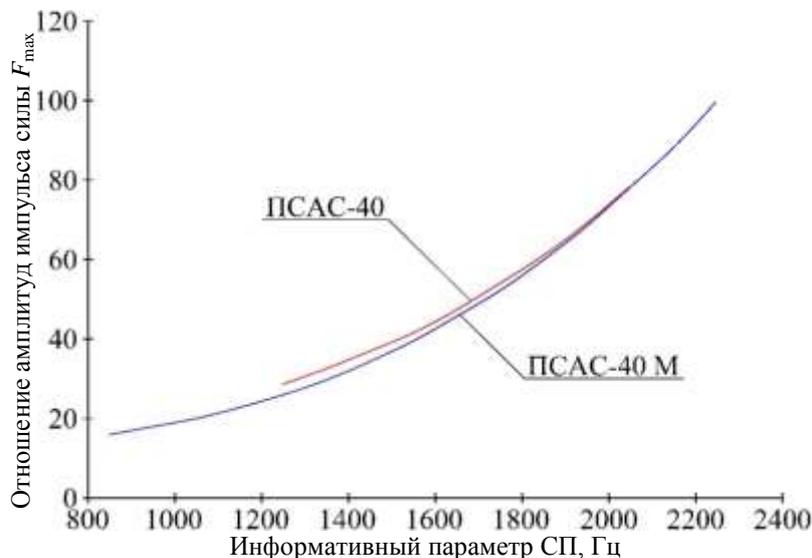


Рис. 4. Экспериментальные зависимости  $F(f)$  в рабочем диапазоне частот СП

Анализ представленных на рис. 3 и 4 материалов теоретических и экспериментальных исследований показывают следующее:

1) для реальных конструкций СП при изменении измеряемого параметра  $P$  от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$  информативный параметр СП (частота) изменяется в диапазоне от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ , что соответствует для СП типа ПСАС-40 1200–2000 Гц для, а ПСАС-40М – 800–2200 Гц, т. е. на 66% – для ПСАС-40 и 75% – для ПСАС-40М соответственно;

2) полученные в процессе эксперимента данные свидетельствуют о том, что для поддержания постоянства относительной погрешности измерения, при изменении измеряемого параметра НДС  $P$  от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$ , амплитуда импульса возбуждения должна измениться для СП типа ПСАС-40 в 2,7 раза, а для ПСАС-40М – в 5,5 раза.

Экспериментальные и теоретические зависимости, представленные на рис. 3 и 4 имеют отличия, обусловленные двумя объективными обстоятельствами:

1) конструктивными особенностями конкретных СП, использованных в эксперименте, а именно: во-первых, различными значениями конструктивных зазоров  $\delta_0^k$ ; во-вторых, эффектом прецессии колебания струны (рис. 5), который особенно резко проявляется в случае несовпадения направления действия возбуждающего импульса и плоскости колебания струны. Изменение плоскости колебания резонатора в пространстве связано, очевидно, одновременно влиянием нескольких факторов, таких как различной жесткостью струны во взаимно перпендикулярных плоскостях, ориентацией направления действия импульса силы относительно оси резонатора, условиями закрепления резонатора в корпусе преобразователя;

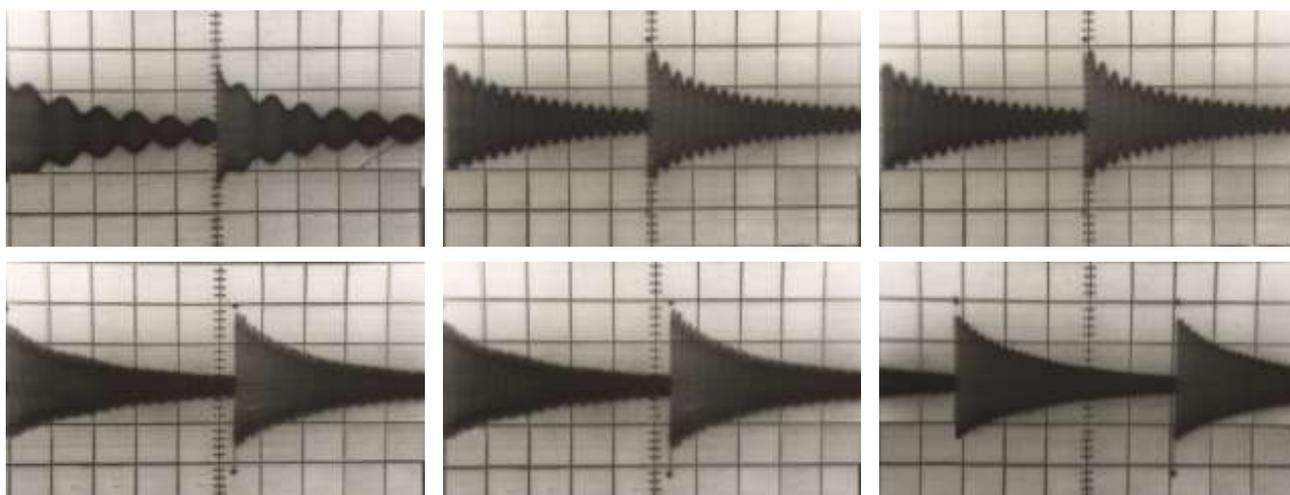


Рис. 5. Влияние эффекта прецессии колебания струны

2) различной степенью экранизации СП и КС, что не обеспечивало одинаковой степени защиты от электрических помех, т. е. не обеспечивало равенства значения параметра «сигнал/шум», особенно при значениях выходного параметра СП ниже 10 мВ, т. е. при  $f_{\min}$  и  $y_{\min}$ .

Наличие значительной амплитудной погрешности струнного метода измерения и недостаточной помехоустойчивости сдерживало его применение в СМТС СС [7]. Устранение указанных недостатков возможно путем реализации условий по выражению (1).

Требование, сформулированное в (1), было реализовано в устройстве для возбуждения непрерывных колебаний струны (УВНКС), обеспечивающем постоянство относительной погрешности измерения частоты колебаний струны на всем интервале измерения СП. Реализованные в УВНКС технические решения подтверждены патентами РФ на изобретения [8, 9]. УВНКС является принципиально новым блоком в модернизированном устройстве диагностики и контроля УДК-01 М, используемом в СМТС СС и обеспечивающим более высокий уровень достоверности оценки технического состояния строительных конструкций СС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье теоретически и экспериментально обоснована и предложена к применению в СМТС СС зависимость (1) между амплитудой импульса возбуждения и частотой колебания струны, обеспечивающая постоянство относительной погрешности измерения частоты колебаний струны СП.

Применение УДК-01 М обеспечивает постоянство относительной погрешности измерения частоты колебаний струны на всем интервале измерения СП от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$ .

При использовании УДК-01 М в реальных условиях эксплуатации тензометрических комплектов СМТС СС амплитуда импульсов возбуждения должна корректироваться путем подбора значения коэффициента  $K$  (см. выражение (1)), учитывающего конструктивные особенности каждого конкретного СП.

## Список используемых источников

1. Gusev Nikolay, Kucherenko Alexandr, Svatovskaya Larisa. Effect of changing of the parameters of the cable network of monitoring systems of high-rise buildings on the basis of string converters on their operability // Megacities and tall buildings, E3S Web of Conferences 33, 2018. – DOI: 10.1051/e3sconf/20183302069.

2. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. Интеллектуальная система мониторинга эксплуатационного состояния стартовых сооружений на базе струнных преобразователей деформаций // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2020. – Вып. 139-140. – С. 115–122.

3. Датчики: справочное пособие / В. М. Шарапов [и др.]. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.

4. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. Повышение помехоустойчивости систем испытаний и одновременного контроля стартовых сооружений после аварийных ситуаций на объектах космической инфраструктуры // Сборник науч.-тех. конф. «Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения». – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. – С. 17–21.

5. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. Совершенствование импульсного способа возбуждения колебаний струнных преобразователей путем применения возбуждающего импульса в форме полусинусоиды // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 672. – С. 376–381.

6. Сачков И. Н. Электромагнетизм: эффекты, история, парадигма: учеб. пособие. – 2-е изд., ред. – М.: Красанд, 2014. – 208 с.

7. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. Влияние сформировавшегося при особых нагрузках и воздействиях напряженно-деформированного состояния на оценку несущей способности конструкций специальных сооружений // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 669. – С. 29–37.

8. Пат. 2689283 РФ : МПК G01L 1/10 (2006/01). Устройство для возбуждения непрерывных колебаний струны / Гусев Н. Н., Кучеренко А. О.; заявители и патентообладатели Гусев Н. Н., Кучеренко А. О. – № 2018105219/28 ; заявл. 12.02.2018 ; опубл. 24.05.2019, Бюл. № 15. – 3 с.

9. Пат. 2728245 РФ : МПК G01L 1/10 (2006/01). Устройство для возбуждения непрерывных колебаний струны / Гусев Н. Н., Кучеренко А. О., Бирюков А. Н., Бирюков Ю. А., Бирюков Д. В., Бирюков Н. А.; заявитель и патентообладатель ФГКВОУВО ВА МТО имени генерала армии А. В. Хрулева. – № 2020107643 ; заявл. 18.02.2020 ; опубл. 28.07.2020, Бюл. № 22. – 3 с.

В. З. Величкин\*,

доктор технических наук;

А. Ю. Городишенина\*;

М. В. Петроченко\*,

кандидат технических наук;

Е. А. Тюрин\*\*,

кандидат технических наук, доцент

\*Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург.

\*\*Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

## МЕТОДИКА ПОТОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ СООРУЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В статье рассматривается совершенствование методики сетевого моделирования для решения задач при проектировании организации работ по строительству уникальных сооружений ракетно-космического комплекса, в которых протекают сложные разнообразные технологические процессы. Приведен пример формирования и расчета матрично-сетевой модели по возведению сооружения технологического блока на ракетно-космическом комплексе, включающий 14 технологических процессов. Приводятся результаты расчетов, показывающие актуальность выбранной методики.

Ключевые слова: организация работ, поток, поточное строительство, ракетно-космический комплекс, технологический блок, сетевая модель, критический путь, топология, планирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных факторов повышения эффективности капитальных вложений является установление при планировании строительства экономически обоснованных сроков его осуществления. При планировании и проектировании организации строительства эти сроки принимаются на основе норм продолжительности строительства. При проектировании организации работ по строительству достаточно сложных объектов, например, ракетно-космический комплекс (рис. 1), в состав которого входит стартовый и технический комплекс, а в совокупности более сотни зданий и сооружений, такие нормы отсутствуют.



Рис. 1. Зональное размещение КРК «Ангара» на космодроме Плесецк

В настоящее время у нас в стране и за рубежом ведутся исследования по разработке методик оптимизации строительства. Анализ этих методик показывает следующее:

- к настоящему времени достаточно полно установлены структура и сущность основных факторов, влияющих на продолжительность строительства;
- в качестве критерия оптимизации сроков, как правило, принимаются суммарные затраты, связанные со строительством;
- получила обоснование зависимость «время-стоимость» как экстремальная функция;
- признана необходимость учета динамики инвестиций в форме капитальных вложений как одного из решающих факторов, определяющих эффективность строительства.

В связи с постоянно ускоряющимся обновлением технологии и увеличивающихся сложностью и интенсивностью строительных процессов возникает необходимость в совершенствовании продолжительности строительства и повышении экономической обоснованности назначаемых сроков строительства на основании экономико-математических моделей, которые учитывают основные факторы, обуславливающие продолжительность и величину затрат для конкретных условий. Наиболее удобной формой отражения всей взаимоувязки последовательности выполнения строительно-монтажных работ является сетевая модель [1–7]. Сетевая модель позволяет проследить последовательность выполнения строительных и технологических процессов и их взаимоувязку при реализации.

На таких уникальных объектах, как космодромы существенное влияние на последовательность и сроки выполнения работ оказывает учет их взаимоувязки по отдельным частям сооружений и организованным фронтам протекающих строительных процессов.

Как показала практика, реализации крупных проектов (например, Союз-Аполлон) сетевая модель становится весьма громоздкой и плохо обозримой по учету взаимоувязки процессов и согласованию их движения по фронтам работ. Кроме того, на такой сетевой модели достаточно сложно рассмотреть варианты применения различных методов и технологий организации работ. К этим методам, прежде всего, следует отнести метод критического пути, метод непрерывного использования технических и трудовых ресурсов, метод непрерывного освоения фронтов работ и метод быстрого развертывания работ (метод ранговых связей).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первый взгляд, в случае взаимоувязки комплекса работ, желательно применить матричный метод отражения технологии выполнения работ по различным фронтам. Однако матрица предусматривает строгую последовательность (технологию) выполнения работ.

Сложную пространственную взаимоувязку работ (топологию сети) на такой матрице отразить без специальных алгоритмов и схем представляется невозможным. Одним из возможных подходов для решения таких задач может быть применение матрично-сетевого планирования. На наш взгляд, более удобным для практических расчетов будет построение матричной модели на базе упрощенной и компактной сетевой модели всего комплекса работ. Такой подход наиболее удобен при возведении отдельных сооружений различных комплексов.

Предлагаемая матричная модель в таком усложненном варианте отражает разбивку сооружения на отдельные захватки (фронты работ) применительно к каждому технологическому процессу и весь выполняемый комплекс работ. В опубликованных работах такая матрица рассматривается как матрица с разноразмерными фронтами работ [8–10]. Комплекс выполняемых строительных процессов отражается в такой матрице в последовательности, соответствующей топологии разработанной сетевой модели по возведению рассматриваемого сооружения.

Последовательность выполнения работ в матрице фиксируется слоями, соответствующими основным путям графа (сетевой модели). Работы, связывающие основные пути графа, отражаются наличием нескольких слоев в матрице для данных работ. Расчет сроков выполне-

ния работ на каждой захватке определяется на основе учета готовности фронта работ и в соответствующей топологической последовательности.

Срок начала и окончания  $j$ -й работы на  $i$ -м фронте можно описать следующими выражениями:

$$T_{нач\ ij} = \max \left\{ t_{ок\ i(j-1)} ; t_{ок\ (i-1)j} \right\} ; T_{ок\ ij} = T_{нач\ ij} + t_{ij}.$$

В качестве примера рассмотрим модель возведения сооружения технологического блока на ракетно-космическом комплексе. Основные технологические процессы по возведению сооружения сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Комплекс технологических процессов с указанием длительности выполнения работ**

№ п/п	Название вида работ	Длительность выполнения работ, дн.
1	Монтаж железобетонных рам сооружения	16
2	Монтаж плит покрытия	18
3	Монтаж стеновых панелей	17
4	Устройство кровельного покрытия	22
5	Устройство чернового покрытия пола	13
6	Устройство газобетонных перегородок	14
7	Установка дверных блоков	13
8	Подготовительные работы для установки оконных блоков	4
9	Установка оконных блоков	19
10	Монтаж вентиляционного оборудования	14
11	Установка демонстрационного оборудования	7
12	Монтаж оборудования системы электроснабжения	14
13	Выполнение черновой отделки помещений	23
14	Установка крышного оборудования	10

Данный комплекс технологических процессов был увязан по последовательности их выполнения с помощью сетевой модели, представленной на рис. 2: выделены номера работ, по каждой работе приведены сроки начала и окончания процесса.

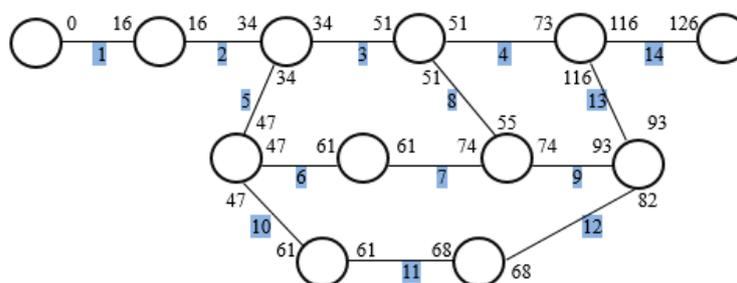


Рис. 2. Сетевая модель возведения сооружения технологического блока

Данная сетевая модель не учитывает совмещение выполняемых работ на различных участках (захватках) сооружения. Она учитывает только сроки завершения работ в соответствии с принятой технологией (топологией) возведения сооружения.

На основе этой сетевой модели разработана матричная модель возведения сооружения с учетом разбиения сооружения по отдельным процессам на ряд фронтов работ (захваток)

(рис. 3). Это модель поточной организации работ, что дает сокращение сроков строительства за счет совмещения работ. На рисунке линиями показаны последовательности выполнения технологических процессов, в каждой ячейке рассчитаны сроки выполнения работ на соответствующей захватке, критический путь выделен затемнением.

Пути графа	Фронты													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	4 0-4	5 4-9	8 13-21	6 21-27	5 32-37	4 37-41	3 41-44	1 44-45	5 45-50	3 50-53	4 71-75	3 75-78	5 78-83	4 89-93
2	4 4-8	4 9-13	8 13-21	5 27-32	3 32-37	4 41-44	7 47-54	1 54-55	4 55-59	7 64-71	3 71-75	4 78-82	6 83-89	6 89-93
3	4 8-12	4 13-17	9 22-31	5 32-37	4 37-41	3 44-47	3 47-54	1 55-58	5 59-64	4 64-71	3 71-75	4 82-86	6 89-95	6 101-107
4	4 12-16	5 17-22	9 22-31	6 37-43	4 43-47	4 47-51	3 54-57	1 57-58	5 64-69	4 71-75	3 75-78	3 86-89	6 95-101	6 101-107
Σ	16	18	17	22	13	14	13	4	19	14	7	14	23	10

Рис. 3. Матричная модель возведения сооружения технологического блока (вариант 1)

Сетевая модель не учитывает разбивку по процессам на отдельные захватки (фронты работ), но при ее составлении учитывалась возможность одновременного выполнения некоторых работ на определенных частях только данного сооружения, без учета рядом устраиваемых шаровых резервуаров. Рассмотрение всего газового комплекса требует значительных размеров чертежей и построений и для освоения технологии проектирования организации работ не предусматривалось. Для сокращения сроков строительства целесообразно по каждому процессу определить фронты работ (захватки) и организовать поточную технологию возведения сооружения. Для данного примера построим матрицу с указанием слоев по последовательности выполнения работ с выделением захваток по каждой работе (рис. 2). На матрице пути графа показаны слоями (линиями). Здесь следующие пути от начала разветвления до конечной работы (дуги графа):

$$-1-2-3-4-14; \quad -2-5-6-7-9-13-14; \quad -3-8-9-13-14; \quad -5-10-11-12-13-14.$$

Как видно из примера (рис. 3), при учете последовательности выполнения работ и соблюдении возможности работы на одном фронте только одной бригады получено сокращение срока строительства с 126 дней до 107 дней. При расчете на матрице принят метод критического пути так же, как и на сетевом графике, но достигнуто сокращение за счет поточной организации работ на выделенных фронтах. На сетевой модели (рис. 2) принята возможность одновременного выполнения нескольких работ на одном фронте. Тогда при построении и расчете матричной модели в полном соответствии с сетевой моделью при поточной организации работ получаем сокращение сроков строительства с 126 дней до 65 дней (рис. 3). На рисунке линиями показаны последовательности выполнения технологических процессов; в каждой ячейке рассчитаны сроки выполнения работ на соответствующей захватке; сроки выполнения работ рассчитаны в соответствии с установленной технологией и при работе на захватке только одной специализированной бригады; критический путь выделен затемнением. Сокращение достигнуто за счет возможности работы нескольких бригад на одном фронте.

По данной матричной модели (рис. 4) построена нормализованная матрица по работам проф. В. А. Афанасьева [1] (рис. 5). Сроки выполнения работ по нормализованной матрице полностью соответствуют срокам матрицы на рис. 3. Приведенная нормализованная матрица на рис. 5 рассчитана по методу непрерывного освоения фронтов работ. Срок выполнения работ составляет 107 дней.

Расчет по нормализованной матрице приводит выполнение работ по методу ранговых связей к продолжительности в 122 дня.

Пути графа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Фронты													
1	4 0-4	5 4-9	8 13-21	6 21-27	5 13-18	4 18-22	3 22-25	1 21-22	5 25-30	3 12-21	4 19-33	3 33-36	5 36-41	4 47-54
2	4 4-8	4 9-13		5 27-32		3 22-25	7 28-35	1 22-23	4 35-39	7 22-29		4 36-40	6 41-47	
3	4 8-12	4 13-17	9 22-31	5 32-37	4 18-22	3 25-28		1 31-32	5 39-44		3 33-36	4 40-44	6 47-53	6 59-65
4	4 12-16	5 17-22		6 37-43	4 22-26	4 28-32	3 35-38	1 32-33	5 44-49	4 29-33		3 44-47	6 53-59	
Σ	16	18	17	22	13	14	13	4	19	14	7	14	23	10

Рис. 4. Матричная модель возведения сооружения технологического блока (вариант 2)

Пути графа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Фронты													
1	4 0-4	5 4-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	4 4-8	4 9-13	8 13-21	6 21-27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4 9-13	4 13-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	5 27-32	5 32-37	4 37-41	3 41-44	1 44-45	5 45-50	3 50-53	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	3 41-44	-	-	-	-	-	-	-	-
6	4 17-21	5 21-26	9 26-35	5 35-40	4 40-44	3 44-47	7 47-54	1 54-55	4 55-59	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	1 58-59	5 59-64	7 64-71	4 71-75	3 75-78	5 78-83	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4 79-83	6 83-89	4 89-93
9	-	-	-	6 55-61	4 61-65	4 65-69	3 69-72	1 72-73	5 73-78	4 78-82	3 82-85	4 85-89	6 89-95	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 92-95	6 95-101	6 101-107

Рис. 5. Нормализованная матричная модель возведения сооружения технологического блока

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод построения матричной модели на основе сетевой модели отличается простотой, позволяет рассмотреть несколько вариантов организации работ, выбрать наиболее целесообразную технологическую последовательность и очередность выполнения работ. В данном случае получено снижение сроков строительства на 15%. Критерием выбора метода организации строительства может быть не только срок строительства, а также стоимость выполнения работ или сроки работы ведущих машин. Построение матричной модели можно выполнять через соблюдение принимаемой технологией выполняемых работ без построения сетевой модели. Для всего комплекса сооружений ракетно-космического комплекса лучше применить матрично-сетевую модель с расчетом организации работ на отдельных сооружениях по предлагаемой методике.

**Список используемых источников**

1. *Афанасьев В. А.* Поточная организация строительства. – Л.: Стройиздат, 1990. – 203 с.
2. *Голдратт Элияху М.* Критическая цепь : пер. с англ. – М.: ТОС Центр, 2006 – 272 с.
3. *Baiburin A. K., Golovnev S. G.* Implementation of pile foundation quality and serviceability // The Proceedings of the International Geotechnical Symposium «Geotechnical Aspects of Natural and Man-Made Disasters». – Astana, Kazakhstan Geotechnical Society, 2005. – P. 144–147.
4. *Au S. K., Ching J., Beck J. L.* Application of subset simulation method to reliability benchmark problems // Structural Safety. – 2007. – Vol. 29, is. 3. – P. 183–193.
5. *Буценко Е. В.* Практика применения сетевого экономико-математического моделирования процесса инвестиционного проектирования // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2016. – № 1(33). – С. 147–158.
6. *Емельянов Д. И., Понявина Н. А., Чеснокова Е. А.* Решение задачи планирования сложных производственных процессов на предприятии на основе методов сетевого планирования // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – Иваново: Изд-во ИГПУ, 2017. – № 5(371). – С. 28–32.
7. *Иванов М. Ю.* Автоматизация сетевого планирования и управления // Системы. Методы. Технологии. – Братск: Братский гос. ун-т, 2013. – № 2(18). – С. 63–69.
8. *Rowinski L.* Organizacja procesow budowlanych. – Warszawa: PWN, 1979. – 520 p.
9. *Величкин В. З., Петроченко М. В., Птухина И. С.* Матрично-сетевая модель планирования сложных комплексов работ // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 669. – С. 13–17.
10. *Владимиров И. И.* Применение матричного алгоритма расчета продолжительности строительства монолитных зданий с использованием поточной организации строительного производства // Наука и бизнес: пути развития. – Тамбов: Фонд развития науки и культуры, 2018. – № 4(82). – С. 89–96.

В. И. Гера,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Д. Н. Гула,  
*кандидат технических наук;*  
В. Г. Котович,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
С. С. Рябова;  
А. М. Сычева,  
*доктор технических наук, доцент*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЖАРОСТОЙКОГО ПЕНОБЕТОНА ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ГАЗОХОДА УНИВЕРСАЛЬНОГО СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА «АНГАРА»

В работе рассмотрена возможность использования жаростойкого пенобетона в конструкциях газохода универсального стартового комплекса космического ракетного комплекса (УСК КРК) «Ангара» с целью его защиты от газодинамического воздействия при пуске ракеты-носителя. Предложено разделить газоход на зоны по температуре воздействия газодинамической струи. В соответствии с этим разделением предложены конструкции для различных уровней стен газохода с применением жаростойкого пенобетона.

Ключевые слова: стартовые сооружения (СС), жаростойкий пенобетон, газоходы, огнезащита.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы связана с необходимостью использования конструкций на основе жаростойких материалов для стен газохода (ГХ) стартового комплекса (СК), поскольку основная задача ГХ заключается в отводе газодинамической струи (ГДС) ракеты-носителя (РН) и снижении теплового воздействия. Известно, что СС находятся в условиях постоянно возрастающих нагрузок, в связи с этим материалы, из которых изготовлены конструкции ГХ, в процессе эксплуатации значительно деградируют (рис. 1). В основном это связано с высокой температурой и давлением ГДС, с вариантами закрепления металлооблицовки [1] и с использованием не жаростойких материалов для заделки стыков и швов между бетонными плитами [2].



Рис. 1. Деградация бетона боковых стен ГХ УСК КРК «Ангара» в процессе модернизации (реконструкции)

Перечисленные факторы вызывают выкрашивание бетона и разрушение материала стыков и швов. Применяемые варианты крепления металлооблицовки при воздействии ГДС, оказывающей наиболее значимое влияние на их эксплуатационные свойства, способствуют ее де-

струкции. Это говорит о необходимости использования в конструкциях элементов ГХ таких материалов, которые позволят реализовать требуемое количество пусков РН.

Для обеспечения долговечности материалы элементов ГХ должны иметь следующие характеристики [2]:

- высокую жаростойкость и жаропрочность;
- низкий коэффициент температурного расширения (КТР) при рабочих температурах;
- высокие теплоизоляционные свойства;
- высокие деформативные свойства;
- пониженную плотность;
- низкую удельную стоимость.

Проведенный обзор показал, что на сегодняшний день для модернизации и реконструкции специальных объектов (стартового комплекса) особо важной воинской части не исследованы вопросы использования жаростойкого пенобетона (ЖПБ) в конструкциях элементов ГХ с целью повышения их долговечности.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ КОНСТРУКЦИИ ГАЗОХОДОВ

Цель исследования: создание и разработка новых технических и технологических решений для конструкций элементов газохода УСК КРК «Ангара», с применением в них перспективных жаростойких ячеистых материалов.

Объект исследования: газоход УСК КРК «Ангара».

Предмет исследования: конструкции различных зон газохода.

Основная идея работы заключается в разработке новых технических решений для конструкций ГХ с использованием в них ЖПБ средней плотности D600 на основе портландцемента и фиброволокна.

В сравнении с бетоном, ЖПБ, в условиях механического воздействия (давление и разрежение) от газодинамической струи РН, обладает повышенной устойчивостью, так как деформативность ЖПБ на порядок выше, чем у бетона. Это связано с его пористой структурой и наличием в составе пенобетона фиброволокна. Кроме этого, ЖПБ способен обеспечить снижение теплового воздействия на верхнее металлическое покрытие ограждающей конструкции ГХ, а также демпфировать нагрузки, возникающие при температурном расширении металла. Предлагаемые конструкции с использованием ЖПБ обладают пониженной удельной стоимостью за счет использования портландцемента, а не глиноземистого цемента, и будут иметь пониженную массу из-за его низкой плотности.

Использование ЖПБ марки по жаростойкости И600 (температура применения 600°C) на основе портландцемента с дополнительным включением в состав фиброволокна обеспечит высокие огнестойкие и теплоизоляционные свойства, а также низкий коэффициент температурного расширения.

В соответствии с ГОСТ 20910–2019 одной из характеристик долговечности жаростойкого материала является способность образцов бетона выдерживать резкие смены температур – от предельно допустимой температуры применения до 20°C (марка по термостойкости – Т) [3]. Это фактически имитирует условия на СК при воздействии ГДС. Предполагается применение ЖПБ с количеством воздушных теплосмен не менее 20.

Далее с целью разработки новых технических решений для конструкции ГХ был проведен анализ максимальных температур поверхности материалов конструкции в различных зонах ГХ при воздействии ГДС [4].

Анализ показал, что для УСК КРК «Ангара» максимальное увеличение температуры наружной поверхности ( $\Delta T_w^{\max}$ ) боковых стенок ГХ при работе системы водяного охлаждения (СВО) составит (рис. 2, 3):

- 1)  $\Delta T_w^{\max} \approx 680 \text{ }^\circ\text{C}$  – для нижнего ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ в зоне его входного сечения;
- 2)  $\Delta T_w^{\max} \approx 470 \text{ }^\circ\text{C}$  – для второго (снизу) ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ в зоне его входного сечения;
- 3)  $\Delta T_w^{\max} \approx 350 \text{ }^\circ\text{C}$  – для третьего (снизу) ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ;
- 4)  $\Delta T_w^{\max} \approx 190 \text{ }^\circ\text{C}$  – для четвертого (снизу) ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ.

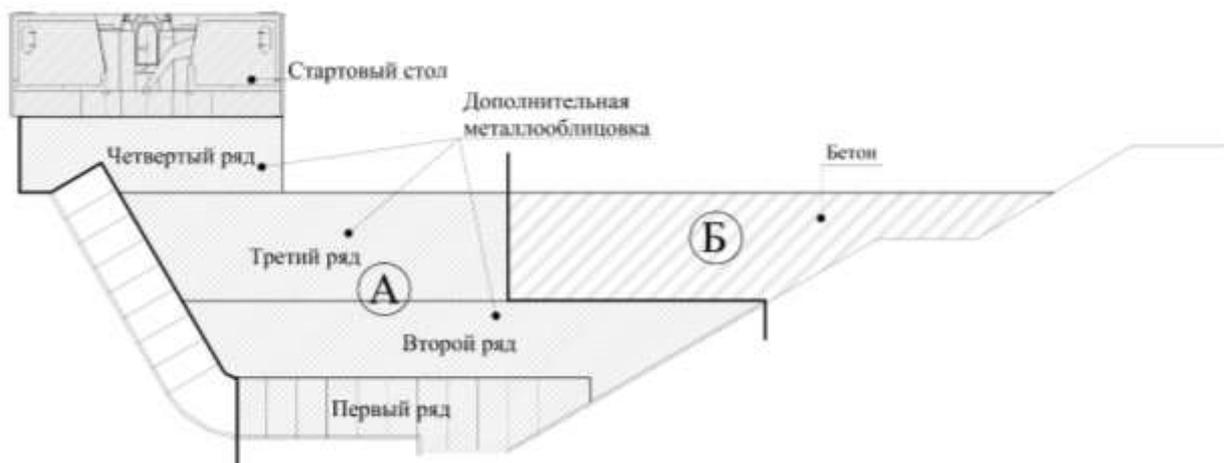


Рис. 2. Разделение газохода на зоны:  
А – основная; Б – периферийная

На рис. 2 показано разделение ГХ в зависимости от интенсивности теплового воздействия на основную (А) зону, куда приходится наибольшее тепловое воздействие, и периферийную (Б) зону, куда приходится значительно меньшее воздействие от ГДС.

Помимо этого, максимальное увеличение средней (по толщине) температуры металлооблицовки ГХ ( $\Delta T_{\text{ср}}^{\max}$ ) составляет (рис. 2, 3):

- 1)  $\Delta T_{\text{ср}}^{\max} \approx 135 \text{ }^\circ\text{C}$  – для нижнего ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ в зоне его входного сечения (при толщине металлического листа  $\delta = 60 \text{ мм}$ );
- 2)  $\Delta T_{\text{ср}}^{\max} \approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$  – для второго (снизу) ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ в зоне его входного сечения (при толщине металлического листа  $\delta = 40 \text{ мм}$ );
- 3)  $\Delta T_{\text{ср}}^{\max} \approx 350 \text{ }^\circ\text{C}$  – для третьего (снизу) ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ (при толщине металлического листа  $\delta = 30 \text{ мм}$ );
- 4)  $\Delta T_{\text{ср}}^{\max} \approx 190 \text{ }^\circ\text{C}$  – для четвертого (снизу) ряда металлооблицовки боковых стенок ГХ (при толщине металлического листа  $\delta = 20 \text{ мм}$ ).

При этом следует учесть, что зона боковой поверхности стен и днища газообразателя на рассматривалась.

На рис. 3 показано разделение зоны А конструкции ГХ по высоте на уровни (I–IV) до поверхности газоотражателя: в соответствии с максимальной температурой наружной поверхности боковых стенок ГХ ( $t_{\text{пов}}$ ) и по максимальному увеличению средней (по толщине) температуры металлооблицовки ГХ ( $t_{\text{ср}}$ ).

Поскольку значительные тепловые нагрузки от ГДС при пусках РН будут приходиться на боковые стенки и днище ГХ, то в работе, для достижения поставленной цели, предлагается конструкцию боковых стен ГХ разделить на зоны по длине, а также на разные уровни по высоте в зависимости от температуры воздействия.

В зоне Б максимальное значение температур поверхности материала ГХ при работе СВО будет составлять  $\approx 460 \text{ }^\circ\text{C}$  [4].

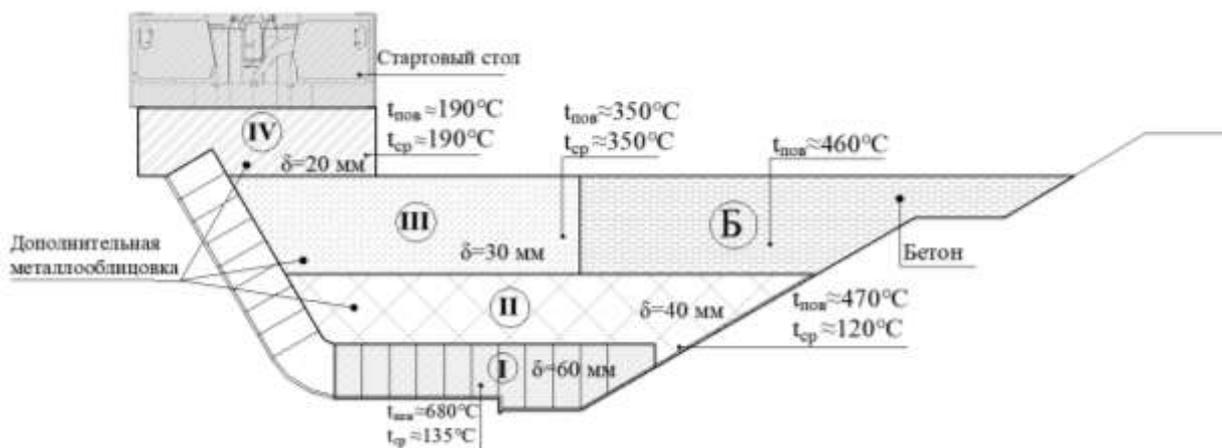


Рис. 3. Разделение газохода на четыре уровня в соответствии с температурой воздействия от ГДС

В соответствии с предложенным разделением конструкций ГХ по высоте, на уровнях I–IV зоны А (см. рис. 2, 3) предлагается использовать ЖПБ под металлооблицовку в виде готовых изделий, скрепленных между собой огнеупорным клеем. Предполагается, что такое решение позволит уменьшить толщину металлооблицовки конструкции ГХ и снизить тепловую нагрузку.

Поскольку в зоне Б (см. рис. 3) газодинамическая нагрузка снижается [4], предлагается использовать в конструкции боковых стенок этой зоны ЖПБ класса И600, который с запасом выдерживает тепловую нагрузку при пуске РН.

Одной из причин деградации конструкций ГХ является способ используемого закрепления металлооблицовки в газоходах СК (рис. 4).



Рис. 4. Способ закрепления листов металлооблицовки газохода СК «Союз-2»

В связи с этим предложено использовать в качестве закрепления «скользящее крепление» (рис. 5), описанное в [1]. Такой вариант технического решения совместно с использованием ЖПБ способен увеличить длительность сроков эксплуатации конструкций ГХ.

Конструкция с использованием ЖПБ для уровней I–IV показана на рис. 6,а, а для зоны Б – на рис. 6,б. Для зоны Б, где воздействия от ГДС значительно снижаются, предлагается использовать ЖПБ в качестве финишного материала без применения металлооблицовки (рис. 6,б).

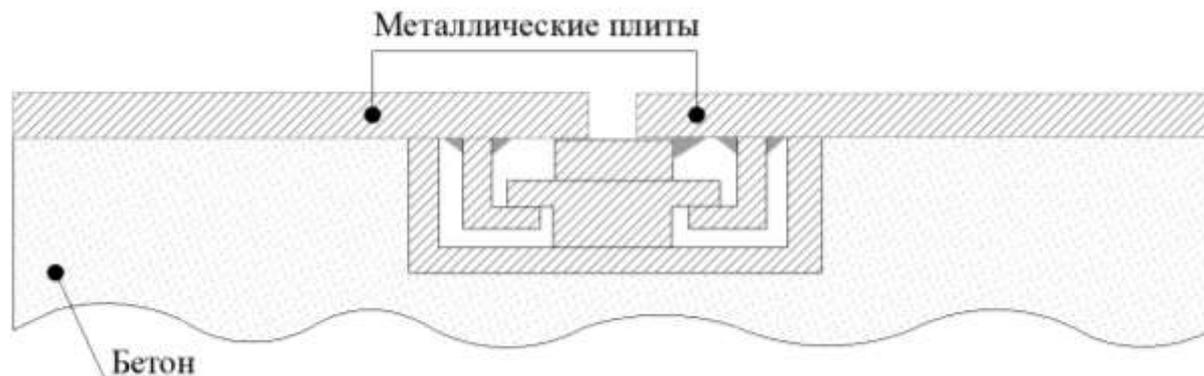


Рис. 5. Способ возможного закрепления

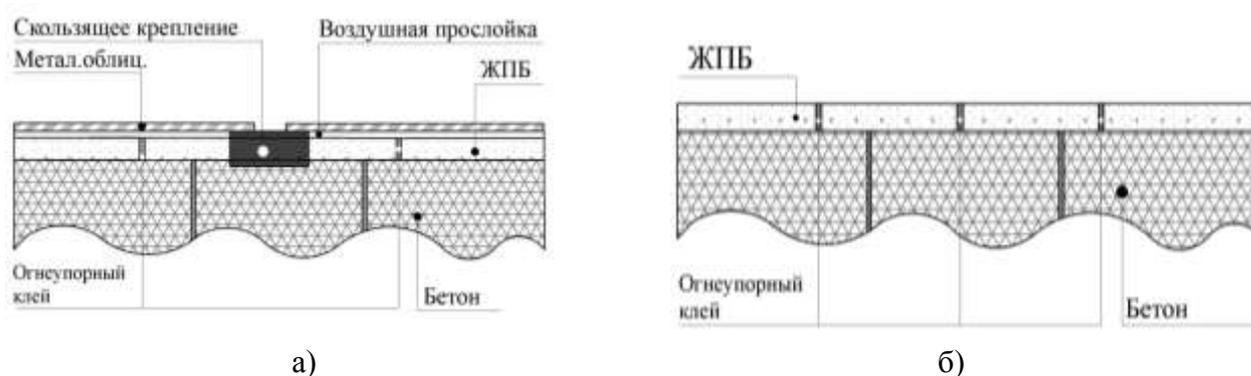


Рис. 6. Варианты использования пенобетона в качестве теплозащитного покрытия

Предлагаемые новые технические решения конструкций элементов ГХ имеют следующие преимущества:

- 1) использование ЖПБ для уменьшения толщины металлооблицовки и снижения массы конструкции;
- 2) повышение долговечности конструкций в условиях механических и температурных воздействий за счет высоких деформативных свойств ЖПБ;
- 3) снижение удельной стоимости за счет уменьшения стоимости сырьевых компонентов и снижение трудоемкости монтажно-демонтажных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

- 1) предложены новые технические решения, которые заключаются в разделении стен ГХ на зоны по длине – основную и периферийную – в зависимости от интенсивности теплового воздействия, а также на уровни по высоте – с I по IV по мере снижения температуры;
- 2) предложены различные варианты конструкции облицовки ГХ с целью обеспечения необходимого числа пусков РН без проведения ремонтно-восстановительных работ СК в период непосредственной угрозы и агрессии в военное время;
- 3) рекомендовано применение ЖПБ в зоне подверженной высокому газодинамическому воздействию РН под металлооблицовку в конструкциях стен ГХ;
- 4) рекомендовано применение ЖПБ в зоне подверженной меньшему газодинамическому давлению в качестве финишного покрытия конструкциях стен ГХ без металлооблицовки.

### Список используемых источников

1. *Гула Д. Н.* Методика оценивания и прогнозирования изменения технического состояния металлооблицовки нулевой отметки универсального стартового комплекса космического ракетного комплекса «Ангара»: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2017.
2. *Иванков С., Гончарук А., Коваль С.* Разработка нормативно-методических документов по расчету и эксплуатационному контролю несущих сооружений стартовых космических комплексов: научно-технический отчет. – М., 2000.
3. ГОСТ 20910–2019. Бетоны жаростойкие. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 6 с.
4. Универсальный стартовый комплекс «Ангара» 14П221. Создание второй пусковой установки / М.П. Ефимов [и др.]. – М.: Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры «Научно-исследовательский институт стартовых комплексов имени В.П. Бармина», 2013.

Т. В. Гинзбург;  
С. В. Зарин,  
кандидат технических наук;  
К. С. Щербуль

## МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО ИХ ЧАСТОТЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В статье представлена методика контроля технического состояния несущих железобетонных конструкций стартовых сооружений ракетно-космических комплексов, которая позволяет повысить достоверность контроля за счет применения вибрационной диагностики при контроле технического состояния пролетных железобетонных конструкций. Анализ нормативной литературы в области обследования зданий и сооружений и математическая зависимость частот собственных колебаний пролетных железобетонных конструкций от геометрических, физико-механических и физико-химических характеристик конструкций и их материалов позволили впервые обосновать границы перехода железобетонных конструкций из одной категории технического состояния в другую.

Ключевые слова: стартовое сооружение (СС), ракетно-космический комплекс, техническое состояние (ТС), железобетонная конструкция (ЖБК), частота собственных колебаний.

### ВВЕДЕНИЕ

Обследование ТС ЖБК стартовых сооружений ракетно-космических комплексов производится согласно методик, использующих неразрушающие методы контроля [1, 2], погрешность которых достигает 50% [3–9], и требующих определения большого количества физико-механических и геометрических характеристик ЖБК [10], доступ к которым в СС затруднен по ряду причин: из-за наличия металлооблицовки газоходов, фальшполов, технологического оборудования и др. (рис. 1).



Рис. 1. Усложняющие факторы контроля технического состояния несущих конструкций стартовых сооружений:  
а – фальшполы; б – металлооблицовка газохода;  
в – технологическое оборудование и инженерные сети

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО ИХ ЧАСТОТЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Порядка 40% от общего объема конструкций СС составляют пролетные конструкции (рис. 2), для контроля ТС которых применима вибрационная диагностика, имеющая ряд преимуществ, а именно: частота собственных колебаний учитывает в совокупности физико-механические, геометрические, конструктивные и иные факторы, характеризующие снижение несущей способности (НС) как основного критерия категорирования ТС конструкций и сооружений, согласно нормативным документам [1, 2].



Рис. 2. Анализ возможных способов контроля технического состояния несущих конструкций стартовых сооружений

Функциональная вибродиагностика основана на колебаниях системы в результате воздействия динамического импульса (ветровой, сейсмической и т. д.) для возбуждения собственных колебаний в процессе ее функционирования. Поле пульсаций от газодинамической нагрузки при пуске РКН позволяет применить функциональную вибродиагностику к СС (рис. 3).

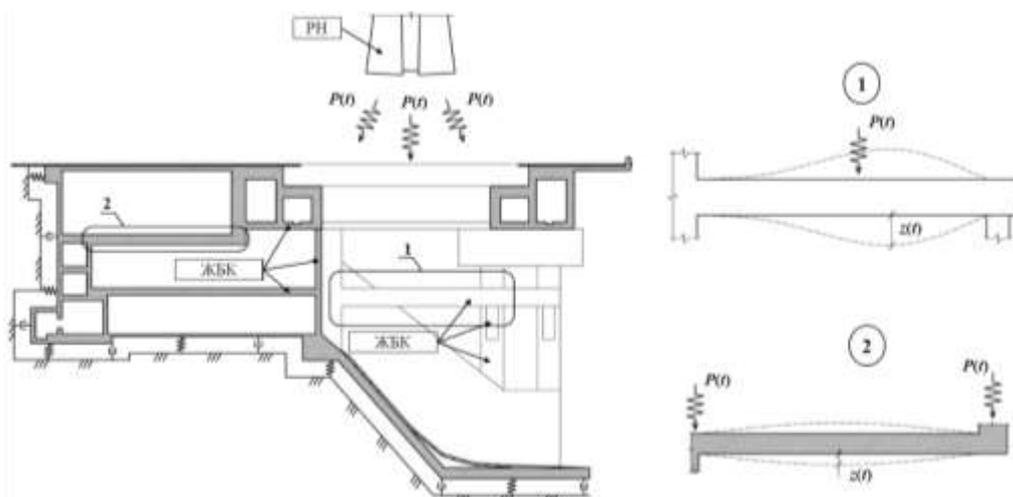


Рис. 3. Железобетонные конструкции стартового сооружения и их колебания:  
1 – в результате прямого воздействия газодинамического импульса на конструкцию;  
2 – в результате воздействия газодинамического импульса на сооружения в целом

Сотрудниками ВКА имени А. Ф. Можайского получена зависимость частоты собственных колебаний от различных характеристик ЖБК [11]:

$$\lambda = \varphi \sqrt{\frac{kD_0 \left\langle 1 - \left[ 1 - \frac{D_{\min}}{kD_0} \right] \left( 1 - e^{-5 \frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}}} \right) \right\rangle}{mL_0^4}}, \quad (1)$$

- где  $\varphi$  – безразмерный коэффициент частоты, зависящий от вида конструкции и способа ее закрепления [12];
- $k$  – корректирующий множитель, зависящий от продолжительности действия нагрузки;
- $D_0$  – жесткость сечения в момент времени  $t$  при моменте нагружения  $t_0$  в предположении линейной зависимости между нагружениями и деформациями и отсутствии трещин, Нм<sup>2</sup> [13];
- $D_{\min}$  – минимальное значение жесткости сечения в момент времени  $t$  и в начале нагружения  $t_0$  в состоянии, предшествующем разрушению, Нм<sup>2</sup> [13];
- $\Delta U$  – фактическое значение энергии образования дефектов и повреждений в конструкции, Нм;
- $\Delta U_{\max}$  – значение энергии образования дефектов и повреждений при разрушении конструкции, Нм;
- $m$  – распределенная в пролете на единицу длины масса конструкции, Нс<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> [12];
- $L_0$  – пролет конструкции, м.

Зависимость (1) позволила снизить погрешность определения частоты собственных колебаний пролетных ЖБК до 8%. Что, в свою очередь, позволяет ее применять для решения практических задач по обследованию (определению категорий) ТС пролетных ЖБК.

Требования к номенклатуре, схемам расстановки и количеству акселерометров, необходимых для регистрации спектров частот колебаний, на пролетных железобетонных конструкциях стартовых сооружений приведены в [14].

Таким образом получены предпосылки для разработки методики контроля технического состояния несущих ЖБК СС по их частоте собственных колебаний.

## МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО ИХ ЧАСТОТЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Разработанная методика (рис. 4) включает в себя семь этапов.

На *первом этапе* производится анализ документации на СС и деление его конструкций по типам (см. рис. 2).

*Вторым этапом* является контроль ТС конструкций, отличных от пролетных, по известным методикам [1, 2]. Мероприятия второго этапа функционально не связаны с мероприятиями третьего, четвертого и пятого этапов. В этой связи они выполняются параллельным методом производства работ.

На *третьем этапе* производится определение количественных значений частот собственных колебаний пролетных ЖБК, на которые установлены вибрационные комплекты, характеризующих границы их переходов из одной категории ТС в другую (рис. 5). Количественные значения частот собственных колебаний пролетных ЖБК рассчитываются на момент времени крайнего пуска РН перед фактическим временем проведения контроля.

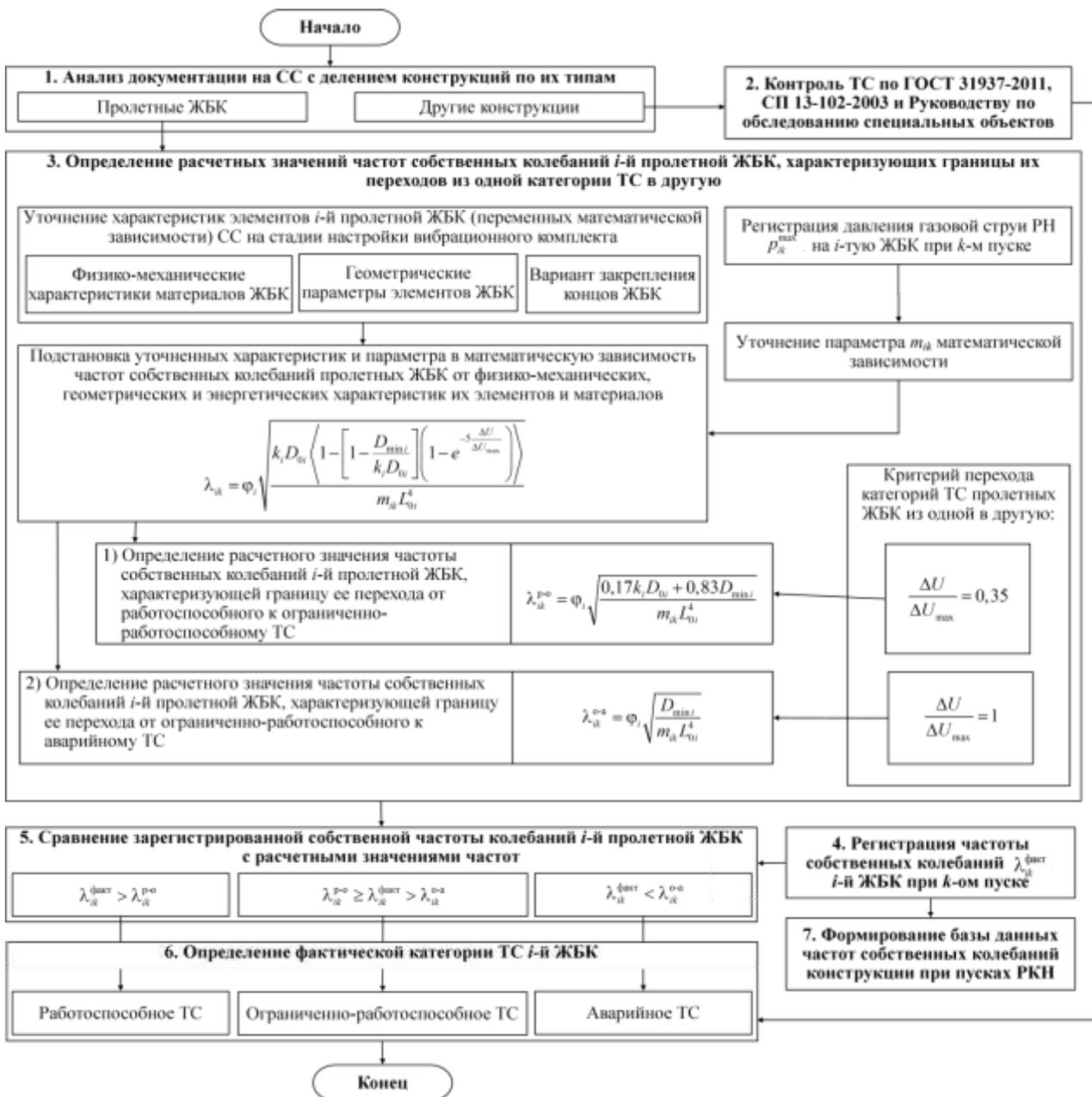


Рис. 4. Методика контроля технического состояния несущих железобетонных конструкций по их частоте собственных колебаний

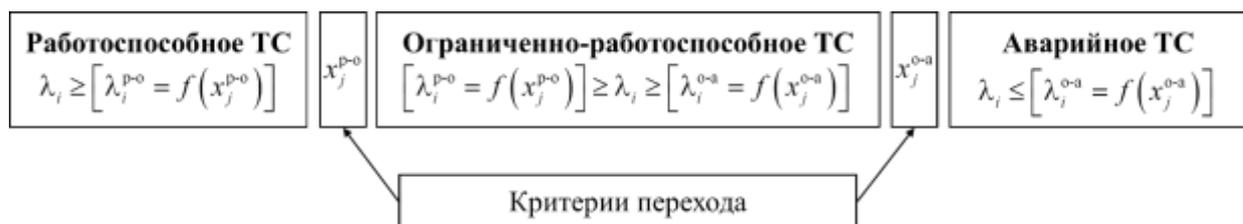


Рис. 5. Категории технического состояния железобетонных конструкций

Для расчета количественных значений частот в разработанной математической зависимости (1) необходимо уточнить характеристики элементов и материалов пролетных ЖБК (переменных математической модели), полученных на стадии установки и настройки вибрационных комплектов. Необходимо уточнить параметр  $m$  математической зависимости (1) на основе данных регистрации давления газовой струи РН  $p_{ik}^{\max}$  (при их наличии) на пролетные ЖБК при крайнем пуске перед началом проведения контроля ТС, а также уточнить количественные характеристики и пространственное расположение сосредоточенных масс на конструкциях (изменение массогабаритных размеров или пространственного положения оборудования и т. д.). Для определения количественных значений частот собственных колебаний пролетных ЖБК, характеризующих границу перехода между работоспособным и ограниченно-работоспособным ТС, принимается критерий перехода

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}} = 0,35,$$

а между ограниченно-работоспособным и аварийным ТС –

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}} = 1.$$

Такие дефекты, как прогибы конструкций являются комплексными характеристиками пролетных ЖБК, учитывающими геометрические, конструктивные и физико-механические параметры конструкций, их элементов и материалов, а также образовавшихся дефектов. В этой связи для определения критерия перехода пролетных ЖБК из работоспособного ТС в ограниченно-работоспособное авторами было выбрано требование нормативных документов по относительным прогибам конструкций. Так как в математической зависимости (1) в качестве переменной относительный прогиб конструкции не используется, то авторами использовались количественные значения частот собственных колебаний при проведении натурального эксперимента с пролетными ЖБК 1ПБ-10-1П при прогибах 1/200 (что соответствует данной границе). На основе этих данных было определено численное значение коэффициента

$\frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}}$ , выраженное из зависимости (1):

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}} = -0,2 \ln \left( \frac{D_{\min}}{D_{\min} - kD_0} - \frac{\lambda^2 m L_0^4}{\varphi^2 (kD_0 - D_{\min})} \right) = 0,35. \quad (2)$$

Зависимость (1) основана на определении двух жесткостей (начальной – без дефектов, и конечной – перед разрушением ЖБК). Коэффициент  $\left( 1 - e^{-5 \frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}}} \right)$  характеризует закон переменной жесткости ЖБК на всех этапах работы конструкции (см. рис. 5). Из этого следует, что если коэффициент

$$\left( 1 - e^{-5 \frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}}} \right) = 1, \quad (3)$$

то это будет характеризовать работу ЖБК на конечном этапе (перед разрушением). Следовательно, критерием перехода ЖБК из ограниченно-работоспособного ТС в аварийное является

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_{\max}} = 1. \quad (4)$$

С учетом данных критериев перехода количественные значения частот собственных колебаний пролетных ЖБК, характеризующих их переход из одной категории ТС в другую, определяются по формулам:

- 1) между работоспособным и ограниченно-работоспособным ТС

$$\lambda_{ik}^{p-o} = \varphi_i \sqrt{\frac{0,17k_i D_{0i} + 0,83D_{\min i}}{m_{ik} L_{0i}^4}}; \quad (5)$$

- 2) между ограниченно-работоспособным и аварийным ТС

$$\lambda_{ik}^{o-a} = \varphi_i \sqrt{\frac{D_{\min i}}{m_{ik} L_{0i}^4}}. \quad (6)$$

На *четвертом этапе* производится регистрация фактических частот колебаний пролетных ЖБК, на которые установлены виброкомплекты (ВК), так же, как и регистрация давлений газовых струй РН при крайнем пуске перед началом проведения контроля ТС.

На *пятом этапе* производится процедура сравнения зарегистрированных частот собственных колебаний пролетных ЖБК с количественными значениями частот, характеризующих границы переходов категорий ТС между собой.

По результатам сравнения зарегистрированных частот собственных колебаний пролетных ЖБК с количественными значениями частот, характеризующих границы переходов категорий ТС между собой на *шестом этапе* производится определение фактических категорий ТС всех ЖБК.

На *седьмом этапе* с целью накопления статистической информации о снижении несущей способности (НС) от пуска к пуску и дальнейшего прогнозирования долговечности СС производится формирование и пополнение базы данных частот собственных колебаний ЖБК при пусках РКН.

### **АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИХ ЧАСТОТЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Апробация методики контроля ТС несущих ЖБК по их частоте собственных колебаний была произведена на железобетонных балках 1ПБ-10-1П.

Геометрические и физико-механические параметры ЖБК 1ПБ-10-1П приведены в табл. 1 и на рис. 6 и 7.

Безразмерный коэффициент частоты, как для однопролетной балки со свободно опертыми концами согласно [12] составляет:

$$\varphi = 1,57. \quad (7)$$

Жесткость сечения в предположении линейной зависимости между нагружениями и деформациями и отсутствии трещин согласно [10, 13]:

$$D_0 = E_{ob} I_{ob} + E_s (I_s + I'_s) = 40403 \text{ Нм}^2, \quad (8)$$

Минимальная жесткость сечения в состоянии, предшествующем разрушению согласно [10, 13]:

$$D_{\min} = E_{b_{\min}} I_{b_{\min}} + E_s (I_{s_{\min}} + I'_{s_{\min}}) = 7290 \text{ Нм}^2. \quad (9)$$

Таблица 1

**Геометрические и физико-механические параметры балок 1 ПБ-10-1П  
и их элементов**

Марка	Размеры, мм									Масса, кг	$E_b$ , МПа	$E_s$ , МПа
	$L$	$L_0$	$b$	$b'$	$h$	$h_0$	$a$	$a'$	$d$			
1ПБ-10-1П	1030	930	120	80	65	53	12	18	4	20	$3 \times 10^4$	$2 \times 10^5$

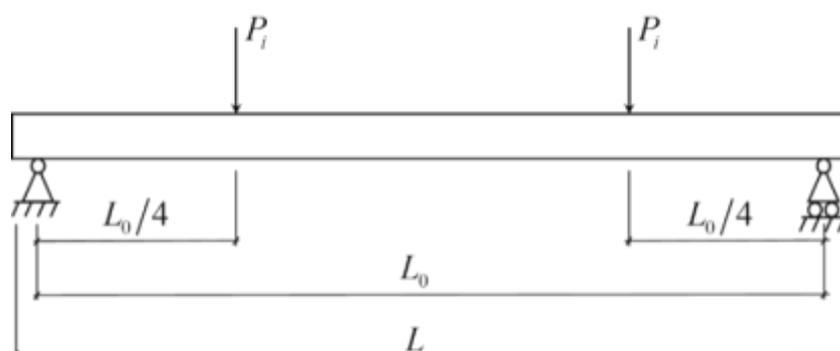


Рис. 6. Расчетная схема балки 1 ПБ-10-1П

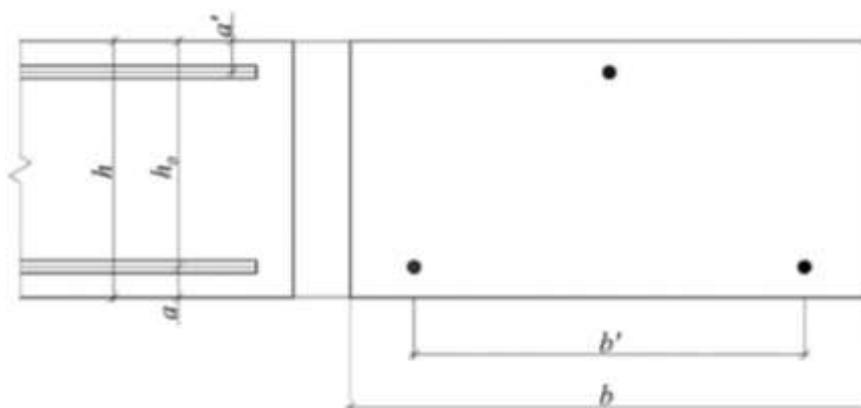


Рис. 7. Разрез балки 1 ПБ-10-1П

Частота собственных колебаний железобетонной перемычки 1ПБ-10-1П для границ перехода между работоспособным и ограниченно-работоспособным ТС, а также между ограниченно-работоспособным и аварийным ТС:

$$\lambda^{p-o} = \varphi \sqrt{\frac{0,17kD_0 + 0,83D_{\min}}{mL_0^4}} = 51 \text{ Гц}; \quad (10)$$

$$\lambda^{o-a} = \varphi \sqrt{\frac{D_{\min}}{mL_0^4}} = 39 \text{ Гц}. \quad (11)$$

Обобщенные результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результат определения частот собственных колебаний  
железобетонных балок 1ПБ-10-1П, характеризующих их переход  
из одной категории технического состояния в другую**

Категория ТС	Работоспособное	Ограниченно-работоспособное	Аварийное
Границы частот, Гц	$\lambda_{\text{факт}} > 51$	$51 \geq \lambda_{\text{факт}} > 39$	$\lambda_{\text{факт}} < 39$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика контроля ТС несущих ЖБК по их частоте собственных колебаний позволяет повысить достоверность контроля за счет применения вибрационной диагностики при контроле технического состояния пролетных железобетонных конструкций.

В ходе работы авторами был обоснован энергетический критерий энергетический критерий, характеризующий количественный переход пролетных ЖБК из одной категории ТС в другую (при переходе пролетных ЖБК из работоспособного в ограниченно-работоспособное

ТС  $\frac{\Delta U}{\Delta U_{\text{max}}} = 0,35$ , из ограниченно-работоспособного в аварийное ТС –  $\frac{\Delta U}{\Delta U_{\text{max}}} = 1$ );

Кроме того, произведена апробация методики контроля ТС несущих ЖБК по частоте их собственных колебаний и определены частоты собственных колебаний границ перехода ЖБК 1ПБ-10-1П из одной категории ТС в другую.

### Список используемых источников

- ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2014. – 89 с.
- СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2004. – 47 с.
- Улыбин А. В. Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1. – С. 4–13.
- Улыбин А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4. – С. 10–15.
- Улыбин А. В. О качестве инструментального обследования зданий // Сборник материалов международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании». – М.: МГСУ, 2015. – С. 222–228.
- Улыбин А. В., Федотов С. Д., Тарасова Д. С. Определение прочности бетона при обследовании зданий и сооружений // Мир строительства и недвижимости. – 2012. – № 45. – С. 2–4.
- Улыбин А. В., Холмин М. С., Фролов А. В. Погрешность при расчете несущей способности плит в обследовании зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 4(55). – С. 19–35.
- Штенгель В. Г. О корректном применении неразрушающего контроля в обследованиях железобетонных конструкций длительно эксплуатирующихся сооружений // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 3(45). – С. 56–62.

9. *Штенгель В. Г.* Общие проблемы технического обследования неметаллических строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 7(17). – С. 4–9.
10. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная версия СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой России, 2015. – 164 с.
11. *Sychova A. M., Zarin S. V., Matskevich A. V.* Theory of determining the frequency of natural oscillations of span structures. // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – 98(6). – DOI: 10.18720/MCE.98.3.
12. *Сорокин Е. С.* Динамический расчет несущих конструкций зданий. – М.: Госстройиздат, 1956. – 339 с.
13. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1988. – 24 с.
14. *Зарин С. В., Ковалев Ф. Е., Головчинская Н. В.* Подбор состава, номенклатуры и схем расстановки вибрационных комплектов системы мониторинга технического состояния пролётных железобетонных конструкций с целью экспресс-диагностирования их технического состояния // Сборник научных статей XXIV научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций». – СПб.: ВИ(ИТ) ВА МТО имени генерала армии А. В. Хрулева, 2020. – С. 121–125.

О. А. Ерохин;  
С. Ю. Карасёв,  
*кандидат технических наук;*  
Д. В. Сурин,  
*доктор технических наук, профессор*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РИКОШЕТА СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ ПРОНИКАЮЩЕГО ТИПА ОТ ЗАЩИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

В статье рассматривается вопрос практического исследования защищенности специальных сооружений от современных обычных авиационных средств поражения, анализируются факторы, влияющие на применение практических (экспериментальных) методов исследований в рассматриваемой предметной области. Используя принципы геометрического и механического подобия, авторы обосновывают проведение модельного эксперимента по исследованию процесса рикошета средств поражения от защитной конструкции специальных сооружений и предлагают оригинальную конструкцию экспериментальной установки. Сформулированные в работе выводы позволяют выявить перспективы и результаты использования предложенной экспериментальной модели и установки. Рассматриваемая в статье тема будет интересна специалистам, занимающимся вопросами обеспечения защищенности и живучести специальных сооружений в условиях применения по ним современных обычных авиационных средств поражения проникающего типа.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, моделирование процесса, защитная конструкция, рикошет, параметры воздействия.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в условиях стремительного развития средств вооружения возникает необходимость усовершенствования средств защиты. В тенденциях развития глобальной защиты объектов Вооруженных Сил РФ от современных обычных средств поражения наблюдается значительное отставание. Современные авиационные средства поражения (СП) по совокупности своих тактико-технических характеристик заметно превосходят защитные характеристики специальных сооружений, для которых предназначены данные средства поражения. Существует множество теоретических исследований, посвященных данной проблематике. При этом практические (экспериментальные) исследования представлены в значительно меньшем объеме. Это обусловлено определенными трудностями, характерными для данной предметной области исследований.

Вопрос практического исследования защищенности специальных сооружений от современных обычных авиационных средств поражения, в том числе в их высокоточном исполнении, сопряжен с различного рода трудностями. В качестве наиболее значимых из них стоит выделить три основных фактора, влияющих на медленное развитие и малое применение практических (экспериментальных) методов исследований в рассматриваемой предметной области.

Первым фактором является глобальность рассматриваемого процесса. Проведение натуральных экспериментальных исследований сопряжено со значительными финансовыми затратами и целесообразность подобного рода экспериментов нельзя достаточно полно оценить на этапе теоретических исследований.

Второй фактор основан на том, что выведенные из эксплуатации сооружения и в целом объекты, которые могут быть использованы в качестве «экспериментального образца» для оценки последствий удара СП, не соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к защитным (фортификационным) сооружениям. Несоответствие заключается в их высоком

физическом износе, обусловленном деградацией конструкционных материалов (сооружения возводились в 70-х годах XX века). Материалы и конструкции этих сооружений не имеют достаточной (близкой к проектной) прочности, которая позволила бы получить достоверные выходные данные при проведении натуральных экспериментов по оцениванию защищенности этих сооружений от СП.

Третий фактор сопряжен с трудностями организации реального применения средств поражения по специальному сооружению, задействования специальной техники и оборудования, а также привлечения соответствующего квалифицированного персонала, имеющего специальные знания и навыки в выполнении таких экспериментальных работ.

Анализ исследований в данной предметной области [1–4] позволил выявить направление экспериментальных исследований конкретных процессов, происходящих при взаимодействии СП с защитными конструкциями (ЗК) специальных сооружений. При воздействии средств поражения по таким сооружениям их основной целью является разрушение защитных конструкций. Рассматривая механизм работы бетонобойных проникающих СП, предназначенных для поражения высокозащищенных заглубленных объектов и сооружений, можно выявить основные механические поражающие факторы (ПФ) СП, требующие детального изучения. К ним относятся разрушение ЗК ударом СП при проникании и разрушение взрывом. Именно в таком хронологическом порядке возникают данные ПФ при воздействии боеприпаса по специальному сооружению. Соответственно для исключения воздействия одного из ПФ на защитные конструкции сооружения необходимо предотвратить его возникновение в процессе взаимодействия боеприпаса и ЗК. Обеспечить отказ взрыва боеприпаса не представляется возможным вследствие того, что при разработке рассматриваемых в работе СП особое внимание уделяется обеспечению высокой надежности всех систем в его конструкции. Следовательно, целесообразно рассмотреть первоначально возникающий поражающий фактор – проникание. Рассматривая данный ПФ очевидным становится вывод, что его антагонистом является рикошет СП от поверхности защитной конструкции, возникновение которого приводит к разрыву хронологической линии процесса поражения специального сооружения проникающим средством поражения. Таким образом, моделирование процесса рикошета является актуальной научной задачей, решение которой позволит получить объективное представление о механических процессах, происходящих при рикошете СП от поверхности защитной конструкции специального сооружения, и выработать методологию управления ими.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РИКОШЕТА СРЕДСТВА ПОРАЖЕНИЯ ОТ ЗАЩИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ**

Наиболее распространенными на сегодняшний день боеприпасами, находящимися на вооружении армии США, являются специализированные противобункерные бомбы типа GBU-15, GBU-24 и GBU-27 с боевой частью BLU-109. Данные боеприпасы находятся с 1990 года на вооружении не только американских ВВС, но и ВВС Канады, Франции, Великобритании, Дании, Бельгии, Саудовской Аравии, ОАЭ и еще семи стран мира [5]. В связи с этим фактом в качестве имитируемого СП в планируемом эксперименте рассматривается BLU-109.

Известно, что процесс рикошета средств поражения от поверхности грунтовой обсыпки или защитной конструкции специального сооружения возникает при углах атаки, превышающих  $60^{\circ}$  к вертикали [6]. Вместе с тем, наличие в грунтовой обсыпке сооружения или в ее защитной конструкции дополнительных элементов, имеющих сопоставимые с боеприпасом прочностные характеристики, может также привести к рикошету. В качестве такой защитной конструкции в числе прочих предлагается рассмотреть комбинированную преграду, включающую дополнительные шарообразные элементы.

Суть экспериментальных исследований процесса рикошета состоит в практическом оценивании фактических углов рикошета СП от обычных и комбинированных преград. Эксперимент планируется провести по принципам геометрического и механического подобия [7]. Под геометрически подобными понимаются тела (фигуры), имеющие одинаковые формы и пропорциональные размеры. Отношение длин линий фигур называется масштабом или коэффициентом подобия.

Применительно к рассматриваемому случаю для имитации боеприпаса ВЛУ-109 длиной 2,5 м и диаметром 0,37 м [5] изготавливается образец (имитатор боеприпаса) с длиной 0,024 м и диаметром 0,0032 м. Таким образом, имеет место геометрическое подобие для движущегося тела в виде

$$K_{r(1)} = \frac{D'}{D} = \frac{L'}{L} = \frac{0,0037}{0,37} = \frac{0,025}{2,5} = 0,01, \quad (1)$$

где  $D'$  – диаметр имитатора боеприпаса, м;  
 $D$  – диаметр реального боеприпаса, м;  
 $L'$  – длина имитатора боеприпаса, м;  
 $L$  – длина реального боеприпаса, м;  
 $K_{r(1)}$  – коэффициент геометрического подобия.

Для определения геометрических параметров преграды рассмотрим радиус кривизны шарообразного элемента комбинированной преграды с геометрически сложной конфигурацией поверхности. Толщину плоской преграды рассматривать нецелесообразно, так как ее величина не влияет на параметры рикошета. Коэффициент геометрического подобия  $K_{r(2)}$  в данном случае составит

$$K_{r(2)} = \frac{r'}{r} = \frac{0,006}{0,6} = 0,01, \quad (2)$$

где  $K_{r(2)}$  – коэффициент геометрического подобия;  
 $r'$  – радиус шарообразного элемента поверхности испытуемой комбинированной преграды, м;  
 $r$  – радиус реального шарообразного элемента поверхности защитной конструкции специального сооружения, м.

Таким образом, на основе зависимостей (1) и (2) следует равенство  $K_{r(1)} = K_{r(2)} = 0,01$ , что демонстрирует соблюдение критерия геометрического подобия в системе двух взаимодействующих тел.

Механическое подобие – более высокая степень подобия. В силу того, что рассматриваемая в работе система является механической, то для достоверности результатов эксперимента процесс необходимо моделировать при условии соразмерности коэффициентов геометрического и механического подобия  $K_r \sim K_m$ . При этом коэффициент механического подобия следует определять для характеристик, которые имеют существенное значение для изучаемого явления [8]. Таким параметром выступает кинетическая энергия движущегося тела  $E_k$ . В нашем случае коэффициенты геометрического и механического подобия находятся в некой корреляционной зависимости вследствие того, что механическое подобие реального и моделируемого боеприпасов зависит от масс имитатора и боеприпаса, значения которых, в свою очередь, зависят от объема этих тел. Вводя в ограничения неизменность прочностных параметров материалов системы (твердость, ударная вязкость, прочность на сжатие, акустическая жесткость и т. д.), примем, что динамические параметры реальной и моделируемой систем должны быть одинаковы. Коэффициент механического подобия в данном случае представим в виде:

$$K_M = \frac{E'_k}{E_k} = \frac{\frac{m'V'^2}{2}}{\frac{mV^2}{2}} = K_{r(1)} = K_{r(2)}, \quad (3)$$

где  $K_M$  – коэффициент механического подобия;  
 $m'$  – масса имитатора боеприпаса, м;  
 $V'$  – скорость движения имитатора боеприпаса, м/с;  
 $m$  – масса реального боеприпаса, м;  
 $V$  – скорость движения реального боеприпаса, м/с.

При условии соответствия динамических параметров реальной и моделируемой систем имеем дополнительные условия для решения уравнения (3) в виде равенства объемного веса  $\rho = \rho'$  и скоростей движущегося тела  $V = V'$  в реальной и моделируемой системах. Тогда уравнение примет вид

$$K_M = \frac{E'_k}{E_k} = \frac{m'}{m} = \frac{V'}{V} = \frac{0,000000269}{0,269} = 0,000001, \quad (4)$$

где  $E'_k$  – объем материала имитатора боеприпаса, м<sup>3</sup>;  
 $E_k$  – объем материала реального боеприпаса, м<sup>3</sup>.

Следует отдельно отметить, что коэффициенты подобия должны коррелировать между собой в границах размерности. Это означает, что при  $K_r = 0,01$  для размерности [м] подобным ему будет  $K_M = K_r^3 = 0,000001$  для размерности [м<sup>3</sup>]. Применительно к планируемому эксперименту масса реального боеприпаса составляет  $m = 900$  кг, соответственно, исходя из условия соблюдения механического подобия в виде  $K_M = 0,000001$ , имитатор должен быть изготовлен массой 0,0009 кг.

Для достижения поставленной цели моделирования процессов была разработана и изготовлена специализированная экспериментальная установка (рис. 1), представляющая собой высокопрочную металлическую конструкцию, состоящую из основания, подвижной рабочей поверхности с полкой для установки испытуемой комбинированной преграды и защитным (гасящим) козырьком, рычажной опорной системы с крепежными винтами и юстируемого калибровочного приспособления. Установка выполнена из листовой стали толщиной  $\delta = 25$  мм.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки для испытания различных преград при моделировании процесса рикошета

Шарнирно-подвижная рабочая поверхность установки позволяет выставлять контактный угол от 0 до 75 градусов. Применительно к процессу рикошета под контактным углом  $\beta_{\text{п}}$  понимается угол, образованный траекторией (линией) движения имитатора боеприпаса и перпендикуляром к рабочей поверхности экспериментальной установки.

Имитатор боеприпаса представляет собой твердое тело цилиндрическо-конической формы (имитация авиационного проникающего боеприпаса) и изготавливается из стали марки 40Х9С2 с последующим термическим упрочнением материала (закалка). Опытные (экспериментальные) образцы преград изготавливаются из соответствующих конструкционных материалов, характерных для изготовления ЗК специальных сооружений (конструкционная сталь, броневая сталь, модифицированный бетон повышенной прочности, соответствующий классу по прочности В60). Кроме классических образцов конструкционных материалов специальных сооружений дополнительно были изготовлены (для испытаний) прототипы покрытия со сложной геометрической конфигурацией поверхности (рис. 2). Образец представляет собой комбинацию твердых тел и пластичного связующего материала. В данном конкретном случае твердые тела представляют собой стальные шары (сталь ШХ15) двух типоразмеров диаметром  $d_1 = 8$  мм и  $d_2 = 12$  мм, в качестве связующего материала использован свинец.



*Рис. 2. Экспериментальный образец комбинированной защитной конструкции со сложной геометрической конфигурацией поверхности*

Гипотеза состоит в том, что при контакте твердого (атакующего) тела с не менее твердой поверхностью шара произойдет изменение траектории движения тела в силу геометрически неустойчивой поверхности шара. Гипотетическое преимущество поверхности со сложной геометрической конфигурацией схематически представлено на рис. 3.

Как видно из схемы, на шарообразной поверхности (позиция I) рикошет отсутствует при условии совпадения траектории движения атакующего тела с линией симметрии шарообразной поверхности. При смещении точки контакта в направлениях осей  $Y$  или  $Z$  (позиция II) возникает рикошет при соблюдении следующего условия:

$$\beta_{\text{к}} \geq \beta_{\text{р(н)}}, \quad (5)$$

где  $\beta_{\text{к}}$  – угол контакта тела с поверхностью материала ЗК, град;  
 $\beta_{\text{р(н)}}$  – нормативный угол контакта тела с поверхностью испытываемой преграды, при котором возникает рикошет [6], град.

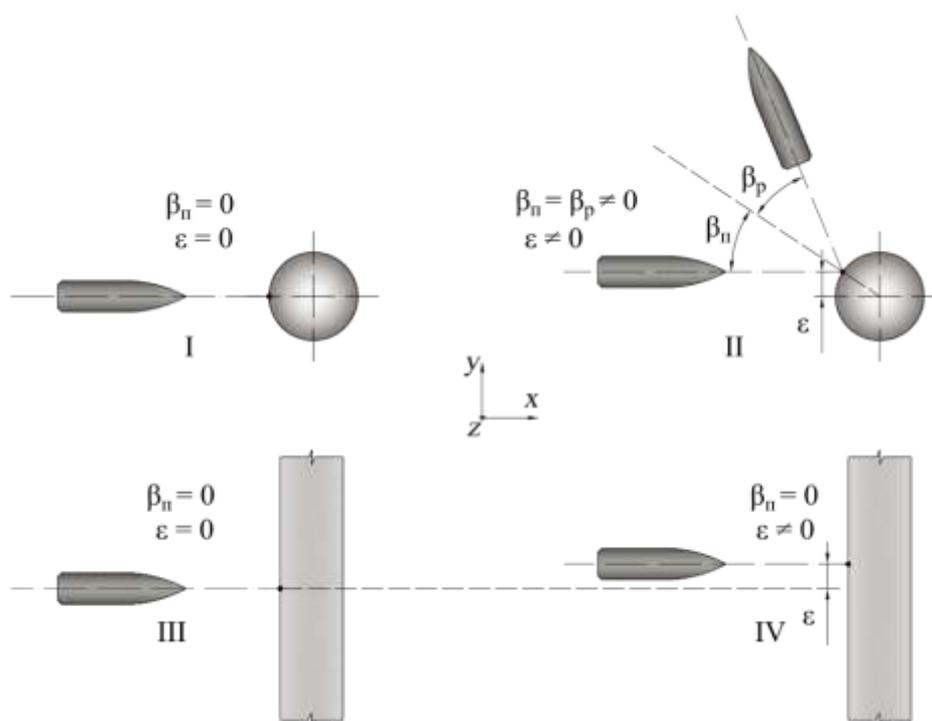


Рис. 3. Схема процесса рикошета от различных преград (шар, плоскость)

Позиции III и IV на рис. 3 наглядно иллюстрируют, что при аналогичном смещении точки контакта атакующего тела с плоской поверхностью рикошета не возникает. Таким образом, геометрически сложная конфигурация поверхности преграды (или ЗК в реальном сооружении) является гипотетически более эффективной для повышения защищенности специального сооружения от СП. В результате экспериментального подтверждения данной гипотезы на основе испытаний были установлены ряд зависимостей, позволяющих комплексно оценить преимущества (или недостатки) рассматриваемой ЗК.

Целью поиска данных зависимостей является создание математического (методического) аппарата для вероятностной оценки рикошета атакующего средства поражения от грунтовой обсыпки или защитной конструкции специального сооружения.

## ВЫВОДЫ

1. Использование предложенной в настоящей работе модели и экспериментальной установки обеспечит проведение масштабированный натурный эксперимент без использования значительных ресурсов, что показывает экономическую эффективность ее применения при исследованиях.

2. На основе полученных результатов можно сделать предварительный вывод о работоспособности выдвигаемых гипотез, а конкретные числовые значения результатов эксперимента лягут в основу теоретических (эмпирических или теоретико-эмпирических) исследований процесса рикошета.

3. Дополнительное техническое, электронное и информационно-программное оснащение разработанной установки позволит расширить область ее применения, увеличить (расширить) диапазон (количество) фиксируемых (контролируемых) параметров, вплоть до конвертированных (путем масштабирования программным способом) параметров в режиме реального времени.

### Список используемых источников

1. Средства поражения и боеприпасы / А. В. Бабкин [и др.]; под ред. В. В. Селиванова. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2008. – 984 с.
2. Балаганский И. А., Мерзиевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 203 с.
3. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду / В. В. Баландин [и др.] // Журнал технической физики. – 2016. – № 6, т. 86. – С. 62–70.
4. *Баринов А. В.* Проблемы защиты объектов экономики и системы государственного управления от высокоточного оружия и основные направления ее решения // Сборник Всероссийской конференции «Проблемы развития и совершенствования ГО РФ в современных условиях». – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам ГО и ЧС МЧС России, 2004. – С. 82–83.
5. *Зубров В. А.* Проникающие авиационные бомбы зарубежного производства // Зарубежное военное обозрение. – 2020. – № 5. – С. 65–69.
6. *Сурин Д. В.* Специальные фортификационные сооружения. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2010. – 349 с.
7. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
8. *Гухман А. А.* Введение в теорию подобия. – М.: ЛКИ, 2018. – 296 с.

С. Ю. Карасёв,

*кандидат технических наук;*

С. А. Мачнев,

*кандидат технических наук, доцент;*

Е. А. Тюрин,

*кандидат технических наук, доцент*

## **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ АРОЧНЫХ ОБСЫПНЫХ СООРУЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В статье рассмотрен графоаналитический метод расчета сопротивления теплопередаче отдельных участков ограждений арочных обсыпных сооружений. Проанализированы известные способы расчета теплопотерь ограждающих конструкций, которые представляют собой расчет плоских стен, т. е. параллельных плоскостей, ограждающих здание с обеих сторон. Произведены расчеты коэффициентов теплопередачи отдельных участков арочного обсыпного сооружения. Представлены отличия от известных способов теплотехнического расчета ограждающих конструкций и предложена зависимость для определения теплопроводности криволинейных многослойных ограждающих конструкций.

Ключевые слова: арочное сооружение, теплопередача, теплопроводность.

Обсыпные арочные сооружения достаточно широко используются на объектах ракетно-космического комплекса. Основное назначение арочных сооружений заключается в обеспечении достаточной защищенности внутреннего оборудования от внешних природных факторов и техногенных воздействий. Рассматриваемое конструктивное решение арки с дополнительным слоем обсыпки способно воспринимать давление в проходящей волне воздушной ударной волны от 0,5 до 2,0 кгс/см<sup>2</sup> [1]. Это достаточно эффективное наземное защитное сооружение для размещения в его внутреннем объеме специального технологического оборудования и личного состава. Обеспечение достаточного уровня защищенности сооружения непрерывно связано с ограждающими конструкциями, такими как сборные железобетонные арки и их грунтовая обсыпка, а расчет теплопотерь всего сооружения через данную ограждающую конструкцию является актуальным вопросом в обеспечении энергоэффективности специальных сооружений.

За последнее время опубликован ряд работ, посвященных оценке теплопотерь через многослойные ограждающие конструкции [2, 3, 4]. Большинство наружных ограждений зданий и сооружений представляет собой плоские стены, т. е. параллельные плоскости, ограждающие здание с обеих сторон [5]. Подбор и расчет данных ограждающих конструкций производится по алгоритмам, описанным в [6]. Учитывая широкое применение арочных обсыпных сооружений на объектах ракетно-космического комплекса, имеется необходимость в разработке рационального метода расчета теплопотерь через обсыпанное грунтом криволинейное покрытие. Данному вопросу и посвящена настоящая статья.

Ограждения арочных сооружений имеют сложную криволинейную форму и представляют собой многослойную строительную конструкцию.

Конструкция арочного ограждения, как правило, включает железобетонную арку, кирпичный изоляционный слой, теплоизоляционный слой из эффективного утеплителя (как правило, пенополиуретан), дренажный слой из песка, грунтовую обсыпку и поверхностный слой растительного грунта. Теплотехнические показатели материалов указанных слоев арочного ограждения имеют существенные различия. Так, например, значения коэффициентов теплопроводности материалов этих слоев могут различаться в несколько раз [7].

Такие факторы, как криволинейность формы и многослойность ограждения обуславливают основные трудности при оценке теплотерь арочных обсыпных сооружений и, в частности, при определении коэффициента теплопередачи.

В практике проектирования наземных сооружений в основном приходится встречаться с расчетами теплотерь через многослойные и составные плоские конструкции ограждений, значения термических сопротивлений которых определяются по формулам:

$$R_{\perp} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots \frac{\delta_n}{\lambda_n}; \quad (1)$$

$$R_{\parallel} = \frac{F_{\text{общ}}}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \frac{F_3}{R_3} + \dots + \frac{F_n}{R_n}}, \quad (2)$$

- где  $R_{\perp}$  – термическое сопротивление многослойной плоской стенки,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;
- $R_1, R_2, R_3, \dots R_n$  – термические сопротивления отдельных слоев плоской стенки,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;
- $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots \delta_n$  – толщины отдельных слоев, м;
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots \lambda_n$  – коэффициенты теплопроводности материалов отдельных слоев,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ;
- $R_{\parallel}$  – среднее термическое сопротивление составной плоской стенки,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;
- $F_{\text{общ}}$  – суммарная площадь поверхности многослойной стенки,  $\text{м}^2$ ;
- $F_1, F_2, F_3, \dots F_n$  – площади, занимаемые отдельными элементами поверхности ограждения,  $\text{м}^2$ .

При более сложных конструкциях плоской стенки, отличных от выше рассмотренных случаев, применяется приближенный метод расчета коэффициента теплопередачи [7, 8]. Этот метод заключается в том, что конструкция ограждения делится на части плоскостями, параллельными направлению теплового потока, а затем плоскостями, перпендикулярными к тепловому потоку, что обеспечивает возможность расчета термических сопротивлений ограждений по формулам (1) и (2) соответственно.

Данный метод расчета  $R$  является приближенным, и его точность будет тем меньше, чем большим будет различие величин  $R_{\parallel}$  и  $R_{\perp}$ . Точное значение величины  $R$  сложного ограждения, отличающегося по форме от плоской стенки, может быть получено только на основании расчета его температурного поля.

Проведенные исследования указывают [2, 4], что строгое решение теплопередачи в сложных строительных конструкциях является трудной теоретической задачей в основном из-за необходимости определения их температурного поля. Поэтому необходимо обращать внимание на то, что в этих случаях теоретически установленные формулы требуют экспериментальной проверки, которая наиболее целесообразна при расчете температурных полей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для решения теплопередачи через сложные ограждения, прежде всего, необходимо знать температурное поле, а для его определения следует применять метод электрического моделирования, как наиболее простой и достаточно точный [5].

Учитывая вышеизложенное, в данной работе предложен графоаналитический метод расчета сопротивления теплопередаче отдельных участков ограждений арочных обсыпных сооружений.

В соответствии с данным методом расчета графически изображается в определенном масштабе поперечное сечение ограждения арочного обсыпного сооружения, внутренний пе-

риметр которого делится на  $n$  равных отрезков; приближенно наносятся изотермические линии на одинаковом расстоянии друг от друга в каждом сечении. Из середины каждого отрезка проводятся линии теплового потока и определяются расчетные значения толщин отдельных участков ограждений  $h_i$ .

В основу графоаналитического метода расчета сопротивлений теплопередаче отдельных участков арочного ограждения положены следующие основные зависимости:

а) для участка ограждения в пределах угла  $(\varepsilon - \beta)$  (рис. 1):

$$R_i = \frac{1}{\alpha_s} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{h_1}{\lambda_{гр}} + \frac{1}{\alpha_0}, \quad (3)$$

б) для участка ограждения в пределах угла  $\beta$ :

$$R_i = \frac{1}{\alpha_b} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{h_1}{\lambda_{гр}} + \frac{1}{\alpha_0} + \frac{P}{\lambda_{гр}} [1 - \cos(\beta - \varphi)], \quad (4)$$

- где  $\delta$  – толщина отдельных слоев ограждения в замковой его части, м;  
 $\alpha_b$  – коэффициент тепловосприятости, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности отдельных слоев ограждения, Вт/(м·°С);  
 $h_1$  – толщина слоя грунта в замковой части ограждения, м;  
 $\lambda_{гр}$  – коэффициент теплопроводности грунта обсыпки, Вт/(м·°С);  
 $P$  – внешний радиус арочного ограждения, м;  
 $\beta$  – угол, в пределах которого арочное сооружение имеет переменную толщину обсыпки;  
 $\varphi$  – текущий угол.

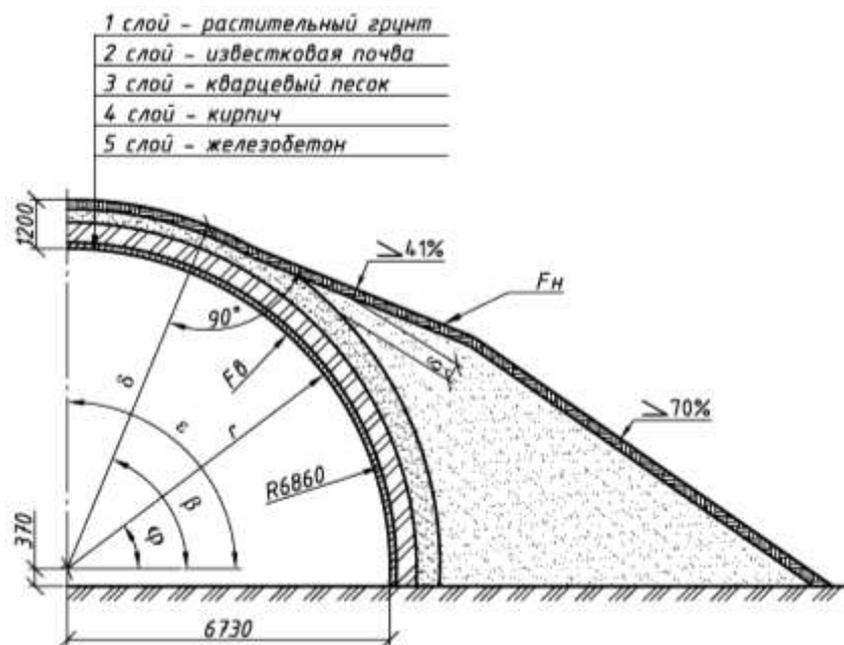


Рис. 1. Расчетная схема арочного обсыпного сооружения:

- 1-й слой – растительный грунт ( $\delta = 0,2$  м;  $\gamma = 1800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 1,0$  ккал/м·ч·град);  
 2-й слой – известковая почва ( $\delta = \text{var}$ ;  $\gamma = 1670$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 1,7$  ккал/м·ч·град);  
 3-й слой – кварцевый песок ( $\delta = 0,5$  м;  $\gamma = 1750$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 1,4$  ккал/м·ч·град);  
 4-й слой – кирпич ( $\delta = 0,06$  м;  $\gamma = 1800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,7$  ккал/м·ч·град);  
 5-й слой – железобетон ( $\delta = 0,07$  м;  $\gamma = 2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 1,4$  ккал/м·ч·град)

При выводе указанных зависимостей принято допущение, что тепловой поток проходит вдоль радиуса  $r$  арки в пределах несущей конструкции, гидроизоляции, защитного и дренажного слоев ограждения и слоя грунта  $h_1$ , а далее он проходит по нормали к поверхности обсыпки.

Сопrotивление теплопередаче пола арочного сооружения определяется в соответствии с [8] или в соответствии с прил. Е [6].

Данный, метод расчета позволяет достаточно просто оценить сопротивление теплопередаче отдельных участков арочного ограждения. Однако этот метод имеет существенные недостатки, а именно:

- принятое в работе направление теплового потока не учитывает фактического температурного поля в арочном ограждении и способствует получению в расчетах завышенных значений сопротивлений теплопередаче;
- зависимости (3) и (4) не отражают влияния кривизны арочного ограждения на величину сопротивления теплопередаче, что также приводит к завышению значения сопротивления теплопередаче;

Рассмотрев недостатки графоаналитического метода расчета, можно наметить более точное графоаналитическое решение теплопередаче через ограждения арочных сооружений исходя из следующих положений.

Для однородного и многослойного ограждений произвольной кривизны, имеющих одинаковые толщины отдельных слоев ( $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ ) по всему сечению ограждения, установлены следующие зависимости для сопротивления теплопередаче:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{F_B}{F_H \alpha_H} + \frac{F_B}{\lambda} \int_0^l \frac{dx}{F_x}; \quad (5)$$

$$R_{\text{мн}} = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{F_B}{F_H \alpha_H} + \sum \frac{F_B}{\lambda} \int_0^l \frac{dx}{F_x}, \quad (6)$$

где  $F_B$  – площадь внутренней поверхности ограждения,  $\text{м}^2$ ;

$F_H$  – площадь наружной поверхности ограждения,  $\text{м}^2$ ;

$F_x$  – площадь поверхности ограждения, расположенной на расстоянии  $x$  от внутренней поверхности ограждения,  $\text{м}^2$ .

В формулах (5) и (6) можно принять, что  $F_B = F_H = F_x$  только в том случае, если толщина однородного (многослойного) криволинейного ограждения  $l$  незначительна. Применительно к ограждениям арочных сооружений, имеющим большую толщину, указанное допущение может привести к существенным погрешностям.

Арочное ограждение имеет изменяющуюся толщину обсыпки по высоте сооружения, поэтому формулы (5) и (6) не могут быть применены для расчета сопротивления теплопередаче непосредственно ко всему ограждению. Однако, если ограждение разделить на определенное число участков, в пределах которого толщина обсыпки постоянна, то для каждого участка можно считать справедливым применение указанных формул.

Далее, ограждение следует рассматривать как составную стенку, состоящую из  $n$  участков, имеющих различное термическое сопротивление.

Таким образом, данный графоаналитический метод расчета заключается в том, что ограждение делится на участки, каждый из которых представляет многослойную стенку с сопротивлением теплопередаче, определяемым по формулам (5) и (6); в целом рассматриваемые участки образуют составную стенку, термическое сопротивление теплопередаче которой определяется по формуле (2).

Вышеуказанные положения рассмотренного в данной работе метода были применены также при определении термических сопротивлений ограждений арочных сооружений, температурное поле которых устанавливалось с использованием метода электротепловой аналогии.

Дальнейшие исследования температурного поля ограждений, позволили установить распределение теплопотерь по периметру арочных сооружений и разработать методику расчета теплопотерь через отдельные участки ограждений, учитывающую влияние кривизны ограждения на величину теплового потока. При проведении указанных исследований ограждения арочных обсыпных сооружений рассматривались как ограждения однородные, т. е. не учитывалась многослойность арочного ограждения.

На основе рассмотренного в работе метода произведены расчеты коэффициента теплопередачи отдельных участков арочного обсыпного сооружения. Результаты расчетов, представленные в табл. 1, показывают следующие полученные результаты расчетного моделирования.

Таблица 1

**Результаты расчета коэффициентов теплопередачи участков ограждений арочного сооружения**

Величина	Номер участка															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Расчетная толщина участка $h_i$ , м	1,2	1,2	1,2	1,35	1,6	2,2	2,8	3,5	4,4	5,7	8,8	12,0	16,8	22,0	27,6	37,6
<b>Поверхностный слой:</b>																
а) толщина слоя $h_{x(i)}$ , м	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
б) площадь поверхностного слоя $F_{x(i)}$ , $m^2$	1,2	1,2	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,55	1,7	1,9	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
в) отношение $F_B/F_{x(i)}$	0,93	0,93	0,93	0,895	0,86	0,83	0,8	0,725	0,66	0,59	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
г) термическое сопротивление слоя $R_{x(i)}$ , $m^2 \cdot ч \cdot град/ккал$	0,183	0,183	0,183	0,178	0,172	0,166	0,16	0,145	0,132	0,118	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,07
<b>Основной слой (обсыпка):</b>																
а) толщина слоя $h_{x(i)}$ , м	0,37	0,37	0,37	0,52	0,77	1,37	1,97	2,67	3,57	4,87	8,6	11,8	16,6	21,8	27,4	32,4
б) площадь поверхностного слоя $F_{x(i)}$ , $m^2$	1,2	1,2	1,2	1,25	1,25	1,3	1,4	1,5	1,7	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
в) отношение $F_B/F_{x(i)}$	0,93	0,93	0,93	0,895	0,895	0,86	0,8	0,75	0,66	0,56	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
г) термическое сопротивление слоя $R_{x(i)}$ , $m^2 \cdot ч \cdot град/ккал$	0,202	0,202	0,202	0,273	0,39	0,695	0,925	1,18	1,39	1,60	2,75	3,7	5,2	6,8	8,6	10,2
<b>Дренажный слой:</b>																
а) толщина слоя $h_{x(i)}$ , м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	–	–	–	–	–	–
б) площадь поверхностного слоя $F_{x(i)}$ , $m^2$	1,18	1,18	1,18	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	–	–	–	–	–	–
в) отношение $F_B/F_{x(i)}$	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,86	0,86	0,86	–	–	–	–	–	–
г) термическое сопротивление слоя $R_{x(i)}$ , $m^2 \cdot ч \cdot град/ккал$	0,335	0,335	0,335	0,332	0,332	0,332	0,332	0,306	0,306	0,306	–	–	–	–	–	–
<b>Изоляционный слой:</b>																
а) толщина слоя $h_{x(i)}$ , м	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	–	–	–	–	–	–
б) площадь поверхностного слоя $F_{x(i)}$ , $m^2$	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	–	–	–	–	–	–
в) отношение $F_B/F_{x(i)}$	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	–	–	–	–	–	–
г) термическое сопротивление слоя $R_{x(i)}$ , $m^2 \cdot ч \cdot град/ккал$	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	–	–	–	–	–	–
<b>Несущая конструкция:</b>																
а) толщина слоя $h_{x(i)}$ , м	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	–	–	–	–	–	–
б) площадь поверхностного слоя $F_{x(i)}$ , $m^2$	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	–	–	–	–	–	–
в) отношение $F_B/F_{x(i)}$	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	–	–	–	–	–	–

Окончание табл. 1

Величина	Номер участка															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
г) термическое сопротивление слоя $R_{x(i)}$ , м <sup>2</sup> ·ч·град/ккал	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	–	–	–	–	–	–
Термическое сопротивление участка $R_{\delta(i)}$ , м <sup>2</sup> ·ч·град/ккал	0,854	0,854	0,854	0,911	1,028	1,327	1,561	1,755	1,962	2,158	2,857	3,8	5,3	6,9	8,7	12,3
Коэффициент теплопередачи участка $K_i$ , м <sup>2</sup> ·ч·град/ккал	0,95	0,95	0,95	0,9	0,81	0,655	0,57	0,51	0,46	0,42	0,325	0,215	0,161	0,128	0,099	0,084

Учитывая, что метод разработан исходя из однородности арочного ограждения, это допущение было оценено путем строгого моделирования отдельных участков ограждений рассматриваемого арочного сооружения следующим образом. Вначале на модели ограждений арочного сооружения установлено температурное поле, учитывающее многосложность ограждений. Затем ограждения арочного сооружения были поделены на участки с учетом установленного температурного поля, разрезав их по соответствующим линиям теплового тока. Для этих отдельных участков ограждений устанавливались значения коэффициентов теплопередачи. Сопоставление результатов данного моделирования отдельных участков с результатами, полученными по предложенному методу, показало, что они имеют расхождение в пределах 5–7%. Это указывает на достаточно высокую точность данного метода.

В случае необходимости учета неоднородности арочного ограждения при расчете коэффициента теплопередачи по предложенному методу рекомендуется принимать среднее значение коэффициента теплопроводности, равное значению  $\lambda$  участка у основания арочного ограждения по направлению радиуса сооружения.

Однако, уместно отметить, что расчет коэффициентов теплопередачи ограждений арочных сооружений при строгом учете значений  $\lambda$  для отдельных слоев ограждений встречает затруднения, которые заключаются в том, что при проектировании неизвестны действительные значения коэффициентов теплопроводности материалов всех слоев арочного ограждения.

Однако известно, что в реальных условиях изменение теплопроводности материалов слоев (особенно грунта) приводит к изменению коэффициента теплопередачи арочного ограждения в несколько раз, тогда как при расчете  $K_{\text{общ}}$  введение среднего значения коэффициента теплопроводности влияет на изменение его величины в пределах 20–25%. Поэтому имеет практический смысл принимать значения коэффициентов теплопроводности грунта в качестве расчетных значений для обсыпных ограждений.

В результате проведенных исследований можно сделать следующий вывод: предложенный метод расчета сопротивления теплопередаче через отдельные участки обсыпных ограждений арочных сооружений является предпочтительным по сравнению с методом, представленным в [8], и может быть рекомендован для теплотехнического расчета криволинейных ограждающих конструкций специальных сооружений ракетно-космического комплекса на этапах реконструкции и нового строительства.

### Список используемых источников

1. Сурин Д. В. Специальные фортификационные сооружения: учебник. – МО РФ, 2010. – 429 с.
2. Sychova A. M., Machnev S. A., Shevchuk A. M. Scientific and practical bases of a method of reception of thin-layer heat-insulating coverings // Materials Science Forum.– 2018. – Vol. 945. – P. 257–262.

3. Определение коэффициента теплопроводности тепловой изоляции на участке трубопровода системы централизованного теплоснабжения / Д. Ф. Карпов [и др.] // Механизация строительства. – 2014. – № 9(843). – С.30–34.
4. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение: пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
5. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
6. СП 50.13330.2012 СНиП 23.02.2003 Тепловая защита зданий. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 02.02.2022)
7. Физические величины: справочник /А. П. Бабичев [и др.]; под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты здания. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037434> (дата обращения: 02.02.2022)

Ф. Е. Ковалев,  
кандидат технических наук;  
А. П. Мохнаткин

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ДОПРЕДЕЛЬНЫХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРОЛЕТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТАРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПО ПАРАМЕТРУ ВЫСОТЫ СЖАТОЙ ЗОНЫ БЕТОНА

В статье рассматриваются методологические проблемы оценивания надежности строительной части эксплуатируемых стартовых сооружений ракетно-космических комплексов в допредельных и предельных состояниях. Одним из основных параметров при выполнении поверочных расчетов изгибаемых железобетонных конструкций по несущей способности является высота сжатой зоны бетона. В зависимости от нагрузки, а также от образовавшихся во время эксплуатации дефектов меняется и высота сжатой зоны бетона. Таким образом, ставится задача исследования изменения несущей способности по параметру высоты сжатой зоны бетона.

Ключевые слова: стартовое сооружение, железобетонные конструкции, техническое состояние, сжатая зона бетона.

### ВВЕДЕНИЕ

Оценивание функциональной пригодности стартовых сооружений (СС), обеспечивающих пуски ракет космического назначения (РКН) с космическими аппаратами военного назначения в установленные сроки, является важной военно-технической задачей.

Основным конструкционным элементом СС являются пролетные железобетонные конструкции (ЖБК), проектирование которых выполняется по методикам, регламентируемым в СП 63.13330.2018 [1].

В исследованиях специалистов ВКА имени А. Ф. Можайского [2, 3] обращается внимание на проблемность ситуации, заключающейся в том, что в соответствии с ГОСТ 27751-2014 [4] по надежности строительных конструкций и оснований зданий и сооружений проектирование ЖБК выполняется по двум предельным состояниям: по несущей способности, по деформативности. Достижение конструкциями указанных технических состояний следует принимать за «отказ». В то же время, остается открытым вопрос о параметрах технического состояния ЖБК в допредельных состояниях, которые согласно СП 13-102-2003 [5] и ГОСТ 31937-2011 [6] оцениваются категориями технического состояния. Последней, предельной категорией считается «аварийное» состояние.

Препятствием для идентификации указанных допредельных состояний изгибаемых ЖБК является то, что в методике их проектирования в СП 63.13330.2018 [1] заданы условия вычисления высоты сжатой зоны бетона  $x$  только проектируемых ЖБК по первой группе предельных состояний по критерию:

$$M \leq M_{ult}, \quad (1)$$

где  $M$  – наибольший изгибающий момент конструкции в зависимости от ее закрепления и загрузки;

$M_{ult}$  – наибольшее усилие, которое может быть воспринято элементом (его сечением) при принятых значениях характеристик материалов.

В соответствии с СП 63.13330.2018 [1] изгибающий момент  $M_{ult}$ , который может выдержать железобетонная балка при изгибе, определяется выражением:

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x(h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_s (h_0 - a'), \quad (2)$$

где  $R_b$  – сопротивление бетона сжатию;  
 $b$  – ширина прямоугольного сечения ЖБК (рис. 1);  
 $h$  – высота сечения ЖБК;  
 $a$  – защитный слой бетона для растянутой арматуры;  
 $x$  – координата нейтральной оси изгиба ЖБК;  
 $R_{sc}$  – сопротивление арматуры сжатию;  
 $A'_s$  – площадь сечения сжатой (конструктивной) арматуры;  
 $a'$  – защитный слой бетона для сжатой арматуры.

При этом следует учесть, что  $h_0 = h - a$ .

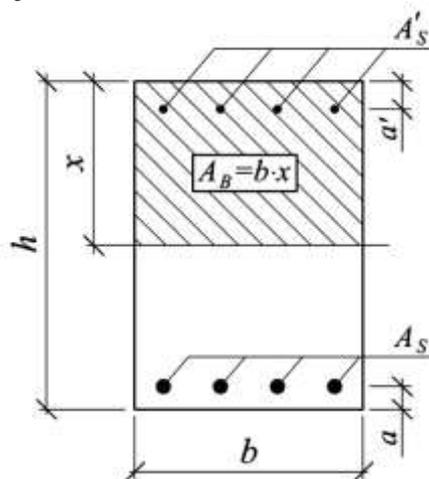


Рис. 1. Схема расчетного сечения изгибаемой балки

Условие равновесия усилий, возникающих в бетоне и арматуре сжатой зоны и в арматуре растянутой зоны сечений изгибаемой ЖБК (рис. 1), имеет следующий вид:

$$R_b \cdot b \cdot x \cdot R_{sc} \cdot A'_s = R_s \cdot A_s, \quad (3)$$

где  $R_s$  – сопротивление арматуры растяжению;  
 $A_s$  – площадь сечения растянутой (рабочей) арматуры.

Исходя из условия (3) определяется координата  $x$ , разделяющая сжатую и растянутую зоны расчетного сечения ЖБК в предельном состоянии [1]:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что характеристики растянутой зоны бетона в этой формуле не учитываются.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

На практике требование по обеспечению надежности проектируемых пролетных ЖБК [4] реализуется за счет использования в выражении (1) коэффициента надежности, как правило, равного больше единицы ( $\gamma \geq 1$ ):

$$\gamma \cdot M \leq M_{ult}. \quad (5)$$

Это приводит к тому, что расчетные проектные значения нагрузок  $q_{расч}$  существенно превосходят фактические нагрузки  $q_{ф}$ , действующие при нормальной эксплуатации зданий и сооружений:

$$q_{\text{расч}} \geq q_{\text{факт}} \quad (6)$$

В практике эксплуатации СС это означает, что при длительном их функционировании первоначально заданные на стадии проектирования запасы несущей способности конструкций снижаются. Для восстановления эксплуатационной пригодности требуется проведение ремонтно-восстановительных работ, невыполнение которых приводит к рискам неготовности строительной части СС к проведению очередного пуска РКН [7, 8].

## ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Очевидно, что для обеспечения безопасной эксплуатации СС необходимо, чтобы в период заданного срока эксплуатации несущие пролетные ЖБК СС работали в допредельных состояниях по условиям (5) и (6). Это требует периодических освидетельствований конструкций СС на определенных временных интервалах с целью установления факта того, что пролетные ЖБК действительно функционируют в допредельных состояниях с определенным запасом надежности по коэффициенту  $\gamma$  равному:

$$\gamma = q_{\text{расч}}/q_{\text{факт}} > 1. \quad (7)$$

Однако выполнение поверочных расчетов несущей способности пролетных ЖБК по методике СП 63.13330.2018 [1] по расчетным формулам (1)–(4) не позволяет выполнять расчеты несущей способности на изгиб в допредельных состояниях при фиксированном для предельного состояния значении координаты нейтральной оси изгиба балочных ЖБК  $x$  (4). В этой связи в работах [2, 3] предложена методика определения высоты сжатой зоны сечения эксплуатируемых ЖБК.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ СЖАТОЙ ЗОНЫ СЕЧЕНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ДОПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Для определения изменения высоты сжатой зоны бетона  $x$  было выполнено имитационное моделирование для балки с параметрами, указанными в табл. 1. К балке равными ступенями прикладывалась равномерно распределенная нагрузка до достижения предельной нагрузки  $q_{\text{пр}}$ :  $(q_{\text{факт}})_1 = 0,25 q_{\text{пр}}$ ;  $(q_{\text{факт}})_2 = 0,5 q_{\text{пр}}$ ;  $(q_{\text{факт}})_3 = 0,75 q_{\text{пр}}$ ;  $(q_{\text{факт}})_4 = q_{\text{пр}}$ .

Таблица 1

Параметры изгибаемой железобетонной балки

$L$ , м	$h$ , см	$b$ , см	$R_b$ , кгс/см <sup>2</sup>	$R_s = R_{sc}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$A_{s_2}$ , см <sup>2</sup>	$A'_{s_2}$ , см <sup>2</sup>	$a$ , см	$a'$ , см	$h_0$ , см	$M_{ult}$ , кгс·см	$q_{\text{пр}}$ , кгс/см
6	50	40	200	3500	15,7	3,14	3	3	47	2430560	54,01

Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Суть методики, позволяющей получать результат, представленный на рис. 2, заключается в разделении несущей способности изгибаемой ЖБК  $M_{ult}$  (3) на две части: для бетона –  $M_b$  и для сжатой арматуры –  $M_{a'}$ . В выражении (2) первое слагаемое это несущая способность, обеспечиваемая сжатым бетоном  $M_b$ , а второе – несущая способность, обеспечиваемая сжатой арматурой  $M_{a'}$ . Если полагать, что снижение НС пролетных ЖБК происходит в допредельных состояниях за счет снижения НС бетона:

$$M_b = R_b \cdot b \cdot x(h_o - 0,5x), \quad (8)$$

то относительно параметра  $x$  получается квадратное уравнение, решением которого является

$$x = h_o - \sqrt{h_o^2 - \frac{M_b}{0,5 \cdot R_b \cdot b}}. \quad (9)$$

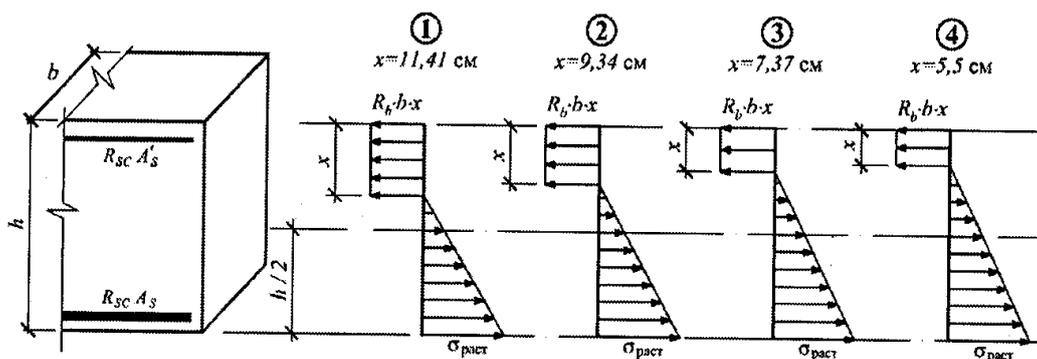


Рис. 2. Трансформация сжатой зоны расчетного сечения железобетонной балки при возрастании внешней нагрузки

Решение (9) имеет смысл при известном значении параметра  $M_b$ , которое может быть вычислено при некотором фактическом значении высоты сжатой зоны бетона  $x_{\text{факт}} > x_{\text{пр}}$  следующим образом:

$$M_b(x_{\text{факт}}) = M_{\text{ult}} - M_{a'} + \Delta M, \quad (10)$$

где  $\Delta M$  – запас НС пролетной ЖБК, вытекающей из соотношения (7).

Фактическое значение высоты сжатой зоны бетона вычисляется в зависимости от предельного значения  $x_{\text{пр}}$ , соответствующего 4-му этапу загрузки на рис. 2, которое определяется согласно СП 63.13330.2018 [1] по формуле (4).

В этом случае с учетом выражения (2) параметр  $\Delta M$  на каждом этапе загрузки ЖБК равномерно распределенной нагрузкой может определяться следующим образом:

$$\Delta M = \frac{(q_{\text{пр}} - q_{\text{факт}}) \cdot L^2}{8}. \quad (11)$$

Тогда, использование расчетных формул (9) и (10) позволяет моделировать ситуации, представленные на рис. 2, которые свидетельствуют о том, что в допредельных состояниях высота сжатой зоны бетона  $x_{\text{факт}}$  существенно выше, чем предельное значение  $x_{\text{пр}}$ , определяемое по СП 63.13330.2018 [1].

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ действующей нормативной базы [5, 6] свидетельствует о наличии методологической проблемы в объективности оценивания категорий технических состояний. Проблема вызвана отсутствием в указанных документах количественных показателей снижения несущей способности конструкций и оснований при переходе их фактического технического состояния в более низкие категории [7, 8]. Применительно к СС это вызывает затруднения в получении обоснованных заключений о категориях технических состояний несущих элемен-

тов СС и оценивании надежности строительной части СС в течение длительного периода эксплуатации.

Наличие указанной методологической проблемы в оценивании показателей надежности строительной части СС может особенно негативно сказываться в периоды обострения военно-политических ситуаций для Российской Федерации, когда возникает необходимость ускоренного проведения пусков РКН в целях наращивания орбитальной группировки космических аппаратов. При этом обоснование функциональной готовности строительной части СС к выполнению пусков РКН в установленные сроки должно базироваться на поверочных расчетах несущей способности конструкций СС. Не зная фактического значения параметра  $x_{\text{факт}}$ , объективно оценить несущую способность по методике расчета в СП 63.13330.2018 [1] не представляется возможным. Это обуславливает военно-техническую актуальность вышерассмотренной методики расчета изгибаемых ЖБК, обоснованность и достоверность которой требует экспериментального подтверждения путем испытания реальных пролетных ЖБК балочного типа с наличием в них различных дефектов бетона, снижающих несущую способность ЖБК по предлагаемым теоретическим зависимостям.

В случае подтверждения правомерности указанной методики расчета пролетных ЖБК при эксплуатации СС появляется возможность диагностирования технических состояний несущих ЖБК СС в их допредельных состояниях. Опыт показывает, что наиболее эффективными для этих целей техническими средствами являются комплекты тензометрического [9] и вибрационного контроля [10], используемые на СС в системах испытания и долговременного контроля. Эффективность применения метода функциональной вибрационной диагностики на СС была подтверждена в работах [2, 3, 10], где исследовалась чувствительность методов вибрационной диагностики к снижению несущей способности пролетных ЖБК путем проведения численных экспериментов имитации снижения их жесткости. При этом малоизученными остаются факторы, по которым может снижаться жесткость изгибаемых ЖБК, включая наличие таких дефектов, как повреждения и трещинообразования бетона. Поэтому целью проведения экспериментальных исследований на реальных ЖБК балочного типа является совместное проведение статических и динамических испытаний с выявлением влияния дефектов бетона в зависимостях (8) и (9) на изменение параметров сжатой зоны бетона  $x$  (рис. 2), а также информативности вибрационных диагностических признаков в идентификации снижения несущей способности пролетных ЖБК в допредельных состояниях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для подтверждения теоретических выводов программой проведения указанных экспериментов предусмотрено использование пятнадцати специально изготовленных однотипных железобетонных балок. Пять балок являются контрольными (без дефектов), а десять имеют различные дефекты бетона, характерные для практики эксплуатации пролетных ЖБК балочного типа.

В аналогичных опытах С. В. Зарина [11] с балочными конструкциями заводского изготовления выявлена информативность диагностических признаков снижения несущей способности пролетных ЖБК, ранее обоснованных в исследованиях Ш. Ш. Исхакова, по критериям снижения изгибной жесткости конструкций. Однако методика проведения экспериментов, в опытах С. В. Зарина, не позволила идентифицировать влияние высоты  $x$  сжатой зоны бетона на снижение их жесткости при трещинообразованиях бетона. В этой связи в опытах предусматривается идентификация изменения параметра  $x$  (рис. 2) путем регистрации напряжений  $\sigma$  на наружной грани статически изгибаемых железобетонных балок с построением эпюры напряжений между сжатой и растянутой зонами бетона в диапазоне от максимальных сжимающих до максимальных растягивающих напряжений, с фиксацией нейтральной оси изгиба балки ( $\sigma(x) = 0$ ), которая соответствует координате  $x$ . Тогда, динамические испытания та-

ких балок (рис. 2) в их допредельных состояниях позволят найти взаимосвязь между изменениями несущей способности, вибрационными диагностическими признаками и высотой сжатой зоны бетона  $x$ .

### Список используемых источников

1. СП 63.13330.2018. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Минрегион РФ, 2019. – 143 с.
2. Проблемы оценивания надежности и безопасности эксплуатируемых сооружений наземной космической инфраструктуры и идентификации их технических состояний / Ш.Ш. Исхаков [и др.] // Известия ПГУПС. – 2016. – Т. 13, вып. 4(49). – С. 592–599.
3. Оценка надежности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний / Ш.Ш. Исхаков [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – СПб.: ГОУ ВПО СПбГПУ, 2012. – № 7(33). – С. 76–88.
4. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
5. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: ГОССТРОЙ РФ, 2004. – 32 с.
6. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: ФА по техническому регулированию и метрологии, 2011. – 89 с.
7. Методические аспекты оценки параметров технического состояния здания и сооружений военных объектов / Ш.Ш. Исхаков [и др.] // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сборник научно-практической конференции. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. – С. 406–410.
8. Задачи адаптации обеспечения надёжности специальных объектов Космических войск нормативным требованиям безопасной эксплуатации военно-строительных комплексов / Ш.Ш. Исхаков [и др.] // Современные направления в строительстве и эксплуатации зданий и сооружений: сборник научных трудов. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2017. – С. 67–75.
9. Гусев Н. Н., Кучеренко А. О., Ковалев Ф. Е. Экспериментальное исследование метрологических параметров датчика деформаций интеллектуальной системы мониторинга // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. – СПб.: НТИЦ «Информтехника», 2020. – Вып. 3-4 (141-142). – С. 149–154.
10. Исхаков Ш. Ш., Ковалёв Ф. Е., Зарин С. В. Об эффективности метода вибрационной диагностики элементов строительной части стартовых сооружений // Известия тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: изд-во ТулГУ, 2018. – Вып. 10. – С. 431–441.
11. Исхаков Ш. Ш., Ковалёв Ф. Е., Зарин С. В. Учет трещинообразования бетона в вибрационной диагностике пролетных железобетонных конструкций // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 99–104.

Н. А. Козлов,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
В. Г. Котович,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Д. В. Сергеев,  
*кандидат технических наук*

## **ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПОСРЕДСТВОМ СПОСОБА ПРЯМОЙ ВЕКТОРНОЙ ЗАСЕЧКИ**

В статье рассматривается способ прямой векторной засечки, реализуемый при геодезическом контроле деформаций объектов наземной космической инфраструктуры по приращениям измеренных величин, без вычисления координат контролируемых точек. Предложен вариант технической реализации рассматриваемого способа. Приводятся формулы расчета угловых и линейных перемещений, а также приращений координат контролируемых точек с учетом угла засечки.

Ключевые слова: геодезический контроль деформаций, прямая векторная засечка, ориентирующий угол.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Согласно [1] к наземным объектам космической инфраструктуры относятся космодромы, стартовые сооружения, различные измерительные комплексы и другие наземные сооружения, используемые при осуществлении космической деятельности. Большинство из указанных объектов базируется на открытой местности, что обуславливает их подверженность влиянию различных нагрузок и воздействий (силовых, динамических, температурно-влажностных, химических, аварийных и др.) [2]. В результате такого влияния неизбежно происходят деформационные процессы, проявляющиеся в виде кренов, прогибов, азимутальных разворотов, нарушения плоскостности объектов. Когда параметры деформаций (величина, скорость развития) превосходят допустимые значения, нормальная эксплуатация объектов и их конструктивных частей становится опасной или невозможной.

### **КОНТРОЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ ОБЪЕКТОВ**

Контроль деформаций объектов на этапах создания и эксплуатации осуществляется с использованием различных методов и средств, в том числе геодезических. Анализ информации, полученной по результатам геодезического контроля, позволяет производить: оценку несущей способности конструкций и агрегатов технологического оборудования; оценку технического состояния изделий; прогнозирование изменений контролируемых параметров с целью планирования сроков и объемов регламентных и ремонтно-восстановительных работ. Применение существующих способов, например, полярного способа, способа прямой засечки и тригонометрического нивелирования [3], позволяет осуществлять вычисление параметров деформаций по координатам контролируемых точек, закрепляемых на сооружении деформационными марками. Реализация указанных способов требует заблаговременной подготовки объекта в геодезическом отношении, а именно:

- проектирования и создания опорной геодезической сети (ОГС) объекта;
- осуществления привязки элементов ОГС к пунктам государственной геодезической сети (ГГС) с использованием способов микротриангуляции или полигонометрии [3];

- создания сети контролируемых точек, закрепляемых на сооружении деформационными марками;
- выполнения измерений с центров пунктов на контролируемые точки с последующим вычислением их координат.

Следует отметить, что практическая реализация указанных мероприятий связана со сложными геодезическими построениями и значительными трудозатратами. В тех случаях, когда требуется определить величину и скорость протекания суточных деформаций, например, на этапе испытаний или при проведении регламентных работ на объекте, необходимость вычисления значений координат контролируемых точек отсутствует. По этой причине существующие способы являются малопригодными, так как не позволяют обеспечить требуемую оперативность и выгодные условия выполнения наблюдений.

В целях решения данной задачи в статье предлагается разработанный авторами и защищенный патентом на изобретение [4] способ прямой векторной засечки, отличающийся от существующих упрощенной технической реализацией и возможностью контроля деформаций за счет определения значений перемещений контролируемых точек непосредственно по приращениям измеренных величин, без вычисления координат контролируемых точек объекта.

## СУЩНОСТЬ СПОСОБА ПРЯМОЙ ВЕКТОРНОЙ ЗАСЕЧКИ

Предлагаемый способ [4] основан на создании ориентирной сети, состоящей из трех ориентирных пунктов (ОРИП), размещаемых равноудаленно на местности вне контролируемого объекта. В качестве исходных данных ориентирной сети используют направления и расстояния до ОРИП, измеряемые с некоторой узловой точкой (УТ). Способ прямой векторной засечки поясняется описанием конкретного, но не ограничивающего существа варианта его выполнения и предлагаемыми схемами.

Реализация способа прямой векторной засечки осуществляется следующим образом.

1. Угломерные приборы (тахеометры) устанавливаются на местности в точках  $B$  и  $C$  (рис. 1), обеспечивающих наблюдения контролируемых точек с минимальных расстояний при углах засечки, близких к  $90^\circ$ .

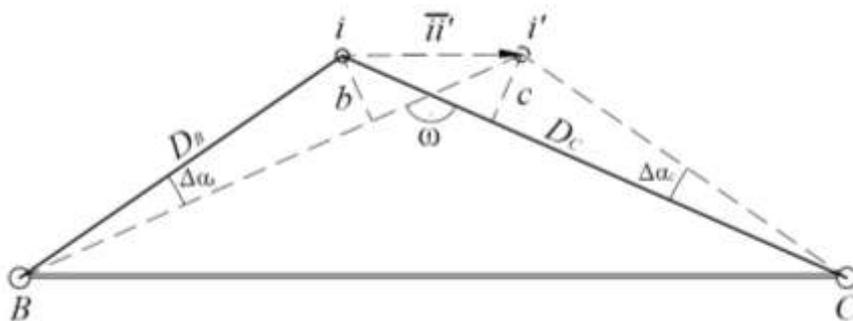


Рис. 1. Схема размещения угломерных приборов на местности при реализации способа прямой векторной засечки

2. Определяют ориентирующий угол [5] каждого прибора по измерениям направлений на ориентирные пункты (рис. 2) по формулам:

$$\operatorname{tg}\alpha_0 = \frac{k_1 \sin(\alpha_1 - N_1) + k_2 \sin(\alpha_2 - N_2) + k_3 \sin(\alpha_3 - N_3)}{k_1 \cos(\alpha_1 - N_1) + k_2 \cos(\alpha_2 - N_2) + k_3 \cos(\alpha_3 - N_3)}; \quad (1)$$

$$k_1 = D_1 \sin(N_3 - N_2); k_2 = D_2 \sin(N_1 - N_3); k_3 = D_3 \sin(N_2 - N_1),$$

- где  $D_{n(1,2,3)}$  – расстояния от узловой точки (УТ) до ОРП $_{n(1,2,3)}$  ;  
 $\alpha_{n(1,2,3)}$  – условные дирекционные углы (азимуты) направлений сторон УТ – ОРП $_{n(1,2,3)}$  ;  
 $N_{n(1,2,3)}$  – измеряемые направления приборами на ОРП $_{n(1,2,3)}$  .

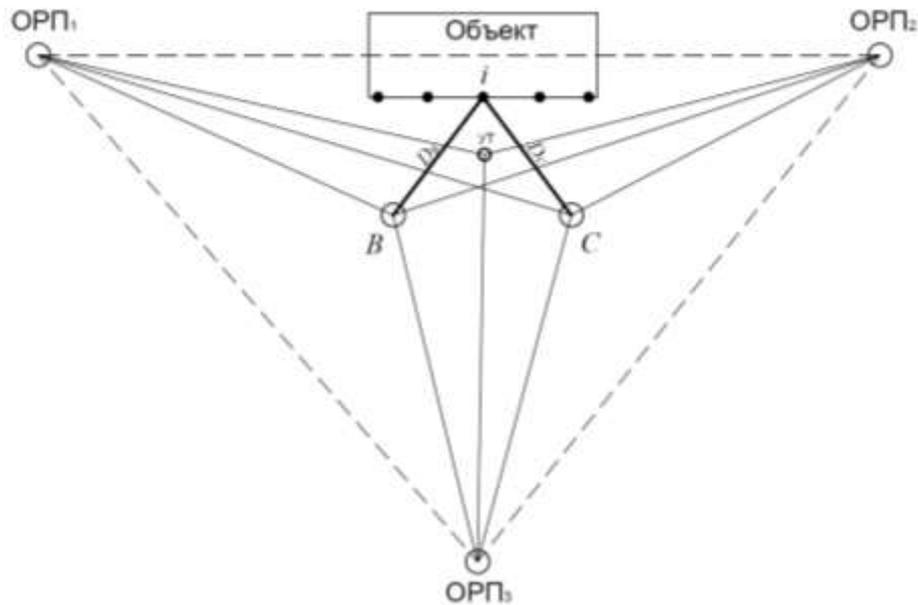


Рис. 2. Схема ориентирной сети объекта

3. Без изменения ориентировки угломерных приборов измеряют направления и расстояния до контролируемых точек и вычисляют дирекционные углы их направлений по формуле

$$\alpha_i = \alpha_0 + N_i, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – дирекционные углы направлений на ОРП;  
 $\alpha_0$  – значение ориентирующего угла прибора.

В последующих циклах контрольных наблюдений фиксируют только отсчеты по горизонтальному кругу  $N_i$ .

4. По разности условных дирекционных углов направлений между смежными циклами измерений определяют величины угловых перемещений контролируемых точек по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_B &= \alpha_{B_i} - \alpha_B, \\ \Delta\alpha_C &= \alpha_{C_i} - \alpha_C. \end{aligned} \quad (3)$$

5. Вычисляют величины линейных перемещений  $b$  и  $c$ :

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{\rho''} D_B \Delta\alpha_B; \\ c &= \frac{1}{\rho''} D_C \Delta\alpha_C, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $D_B$  – расстояние от прибора  $B$  до наблюдаемой точки  $i$ ;

$D_C$  – расстояние от прибора  $C$  до наблюдаемой точки  $i$ ,  $\rho'' = 206265''$ .

Суммарный вектор перемещения  $\overline{ii'}$  контролируемой точки может быть получен по величине перемещений  $b$  и  $c$ , однако анализ перемещений упрощается, если вычислять приращение координат контролируемых точек по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta x &= \operatorname{csc} \omega \cdot (c \cos \alpha_B - b \cos \alpha_C); \\ \Delta y &= \operatorname{csc} \omega \cdot (c \sin \alpha_B - b \sin \alpha_C),\end{aligned}\quad (5)$$

Где  $\omega$  – угол засечки.

6. Значение средней квадратической погрешности (СКП) определения величины перемещения  $\overline{ii'}$  контролируемой точки оценивается по известной формуле для прямой угловой засечки:

$$m_{\overline{ii'}} = m \operatorname{csc} \omega \cdot \sqrt{D_B^2 + D_C^2}, \quad (6)$$

где  $m$  – СКП измерения углового перемещения наблюдаемой точки прибором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан способ прямой векторной засечки, позволяющий осуществлять геодезический контроль деформаций объектов наземной космической инфраструктуры без заблаговременной и трудоемкой подготовки объектов космической инфраструктуры в геодезическом отношении. При необходимости проведения испытаний и долговременного контроля реализация измерений предложенным способом должна осуществляться с имеющихся фундаментальных центров объекта. Актуальность и новизна выполненных авторами исследований подтверждается патентом на изобретение [4], разработанное на основе исследований, проведенных в рамках плановых научно-исследовательских работ.

## Список используемых источников

1. Справочник по эксплуатации космических средств / Л. Т. Баранов [и др.]; под ред. проф. А. П. Полякова. – 2-е изд. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2006. – 758 с.
2. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: Госстрой России, 2004. – 47 с.
3. Инженерно-геодезическое и метрологическое обеспечение строительства и эксплуатации военных объектов: учебник / А. Н. Матвеев [и др.]. – СПб.: ВИККА имени А. Ф. Можайского, 1997. – 424 с.
4. Пат. РФ № 2735311. Способ прямой векторной засечки / Сергеев Д. В., Козлов Н. А., Котович В. Г. – № 2020104072; заявл. 29.20.2020; опубл. 29.10.2020, Бюл. № 31. – 1 с.
5. А. с. 949338 СССР. Способ определения угла разворота лимба угломерного прибора / Н. А. Козлов. – № 2750651/18-10; заявл. 09.04.1979; опубл. 07.08.1982, Бюл. № 29. – 1 с.

Б. П. Лебедь;  
 С. А. Толмачёв,  
*кандидат военных наук, доцент;*  
 А. М. Шевчук,  
*кандидат технических наук, доцент*

## КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МОБИЛЬНО-ЗАЩИЩЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ СИСТЕМ ВООРУЖЕНИЯ

В работе излагается концепция создания перспективных мобильно-защищенных комплексов систем вооружения на основе оснащения их средствами фортификационной защиты и комплексной маскировки. Изложены общие тактико-технические требования к базированию новых комплексов и их основные показатели. Определены перспективы проведения научных исследований по обоснованию повышения живучести мобильно-защищенных комплексов в условиях воздействия обычных средств поражения противника.

Ключевые слова: мобильно-защищенный комплекс, базирование, обычные средства поражения, специальные фортификационные сооружения, тактико-технические и строительные требования.

### ВВЕДЕНИЕ

В Вооруженных Силах России существуют различные по своему назначению мобильные комплексы (МК) систем вооружения, для базирования которых выделяются недостаточные средства на инженерное и строительное оборудование своих боевых и технических позиций в позиционных районах [1]. Однако в условиях расчетного воздействия [2] обычных средств поражения (ОСП) противника, как показывают исследования, их живучесть будет близка к нулю, т. е. такие мобильные комплексы перестанут существовать как боевые компоненты для ведения в дальнейшем с их помощью военных и боевых действий войск. Живучесть МК можно значительно повысить или даже обеспечить на требуемом уровне (рис. 1), если будут совместно применены способы и средства фортификационной защиты (ФЗ) и комплексной маскировки (М). В этом случае МК становятся мобильно-защищенными комплексами [3].

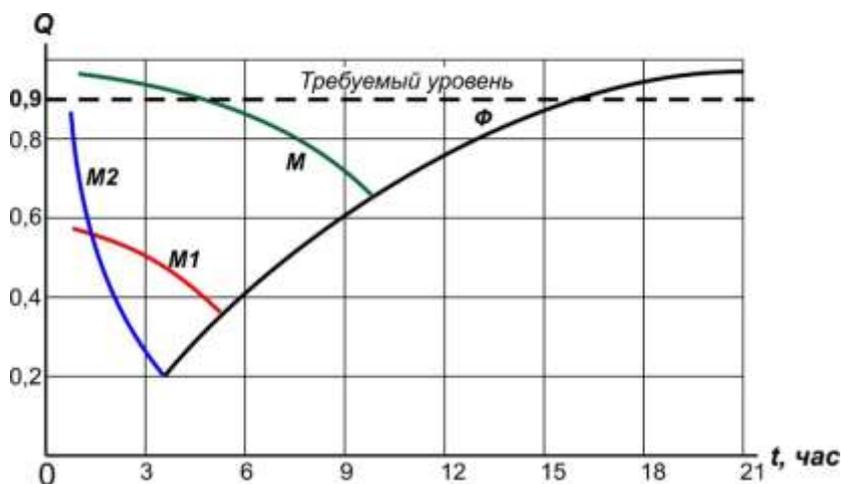


Рис. 1. Зависимость живучести мобильного комплекса в позиционном районе от мероприятий маскировки (М) и фортификационной защиты (Φ):  
 М1 – при заблаговременном обнаружении; М2 – при доразведке перед ударом средств поражения

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНО-ЗАЩИЩЕННОГО КОМПЛЕКСА

Предполагается, что мобильно-защищенный комплекс (МЗК) оснащен мобильными установками соответствующей системы вооружения, имеет оборудованные в инженерном и строительном отношении следующие компоненты инфраструктуры:

- боевые позиции (БП) для размещения и применения в боевом режиме мобильной системы вооружения (МСВ) и для командного пункта управления (КПУ);
- техническую позицию (ТП);
- казарменный и военный городок, размещенные, как правило, на одной позиции.

Все позиции компонентов МЗК должны быть обеспечены:

- автомобильными внутриплощадочными дорогами, подъездами и площадками;
- инженерными коммуникациями водоснабжения и канализации, иметь источник и сеть теплоснабжения;
- подключением к государственной сети электроснабжения или иметь собственные автономные энергетические установки и кабельную сеть электроснабжения;
- собственной системой связи, а также иметь систему охраны и обороны от незаконных вооруженных формирований и диверсионно-разведывательных групп противника.

Компоненты позиционного района базирования МЗК должны быть объединены собственными автодорогами за счет строительства новой или расширения уже существующей сети для маневрирования и переезда мобильных систем вооружения к боевым позициям.

Боевые позиции командного пункта управления и мобильной системы вооружения должны быть оборудованы специальными фортификационными сооружениями (СФС), соответственно СФС котлованного рамного типа со степенью защиты не менее 3-го класса для КПУ и СФС обсыпного арочного типа со степенью защиты не менее 5-го класса для МСВ. Над этими СФС целесообразно устроить специальный защитный туюфак (СЗТ) в защитной толще грунта с целью дополнительной защиты от ОСП противника (рис. 2).

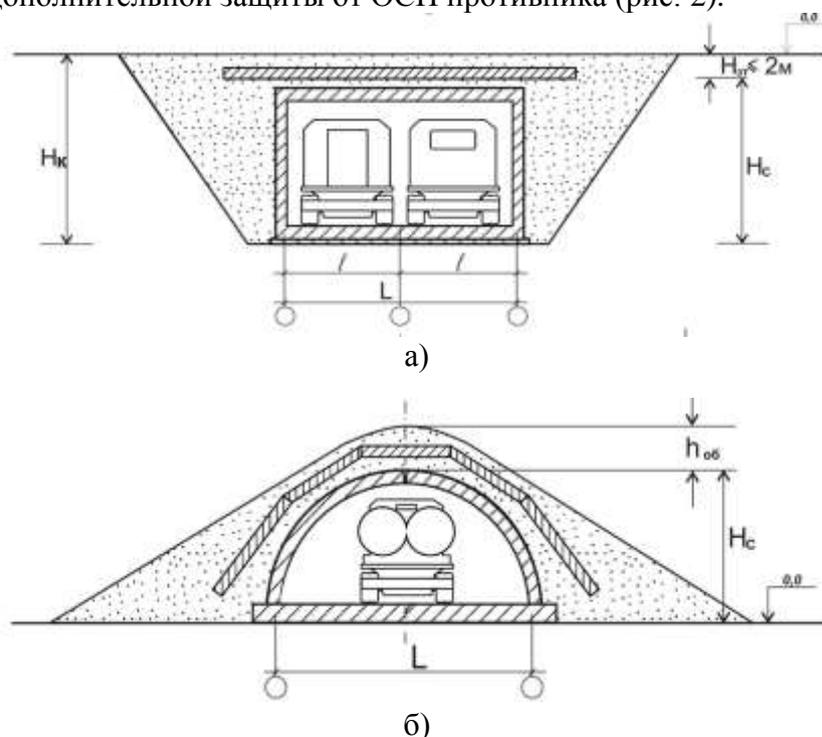


Рис. 2. Схема несущего остова специальных фортификационных сооружений:  
а – котлованного рамного типа; б – обсыпного арочного типа

Боевые позиции с размещенными в СФС мобильными средствами вооружения и командным пунктом управления должны быть рассредоточены между собой на расстояниях, исключающих их уничтожение одним нарядом средств поражения противника.

Все компоненты МЗК оборудуются штатными войсковыми убежищами из расчета размещения всего личного состава боевого расчета, а также обеспечиваются штатными средствами скрытия и имитации с соответствующей механизацией выполнения работ по маскировке техники и сооружений. Личный состав подразделений боевых расчетов должен быть обучен к оперативному применению средств скрытия в кратчайшие сроки в предполетное время ОСП противника непосредственно перед их атакой.

Позиционные районы мобильно-защищенных комплексов оснащаются ложными боевыми позициями, где размещаются макеты вооружения и военной техники соответствующего комплекса, ложные компактные сооружения и некоторые ложные элементы инженерного оборудования из штатных войсковых средств имитации с демонстрацией их функционирования в период атаки ОСП противника. Кроме того, функционирование ложных боевых позиций осуществляется периодически в мирное время с воспроизведением основных демаскирующих признаков МЗК.

Таким образом, комплексное применение средств маскировки может быть осуществлено на основе активного и внезапного (для противника) использования табельных инженерных средств и средств РХБ:

- скрытие инфраструктуры МЗК аэрозолями, дымами, а также искусственными облаками и туманами;
- скрытие сооружений и отдельно стоящих элементов МЗК табельными маскировочными комплектами и масками;
- имитация элементов мобильно-защищенного комплекса (техники и сооружений) макетами с воспроизведением теплового и радиолокационного излучения;
- деформирование геометрии видимых в мультиспектральном диапазоне элементов МЗК ложными фрагментами.

К базированию МЗК предъявляются следующие тактико-технические требования (ТТТ) по обеспечению:

- боевой эффективности применения средств вооружения, размещаемых как открыто, так и в СФС;
- защищенности и живучести комплекса в целом;
- боевой способности и боевой готовности комплекса к выполнению боевой (функциональной) задачи;
- оперативности подготовки к боевому (функциональному) применению средств вооружения в состоянии полной боевой готовности;
- скрытности функционирования (на основе применения средств и способов противодействия техническим средствам разведки противника);
- автономности функционирования комплекса в условиях перевода в режимы боевой готовности (на основе резервирования боевых систем, а также систем жизнеобеспечения и автономных источников электроснабжения);
- восстановления боеспособности функционирования после воздействия средств поражения противника или техногенных и природных поражающих факторов в мирное время;
- противодействия угрозам безопасности информационных систем.

Для каждого ТТТ разработаны соответствующие показатели измерения в вероятностной мере или в физической мере измерения [4]. Рассмотрим некоторые из них.

Под боевой эффективностью мобильной системы вооружения понимается мера способности выполнения боевой (целевой) задачи в мирное время и в условиях ведения войны. В качестве показателя боевой эффективности принимается вероятность выполнения боевой

задачи  $P_{бз}$  в форме произведения коэффициентов боевой готовности  $k_{бг}$ , боевой способности  $k_{бс}$  и живучести  $Q$ :

$$P_{бз} = k_{бг} k_{бс} Q. \quad (1)$$

Под боевой готовностью понимается мера готовности комплекса к выполнению боевой (функциональной) задачи личным составом и средствами вооружения, специальным технологическим оборудованием, техническими системами и специальными системами защиты. Указанная мера боевой готовности определяется коэффициентом боевой готовности и представляет собой произведение коэффициента технической готовности  $k_{тт}$  и коэффициента технической надежности  $k_{тн}$ :

$$k_{бг} = k_{тт} k_{тн}. \quad (2)$$

Под боевой способностью понимается мера достижения требуемых условий и показателей выполнения боевой задачи до начала и в процессе военных действий. Боевая способность оценивается коэффициентом боевой способности  $k_{бс}$  в виде произведения двух коэффициентов – коэффициента уровня боевой подготовки личного состава  $k_{бп}$  и коэффициента полноты штатного состава  $k_{шс}$  войскового формирования:

$$k_{бс} = k_{бп} k_{шс}. \quad (3)$$

Под живучестью мобильного комплекса понимается мера сохранения боевой (функциональной) способности выполнения боевой (функциональной) задачи после расчетного воздействия средств поражения противника или поражающих факторов техногенных аварий и природных стихийных бедствий с учетом восстановления боевой способности.

Основными показателями живучести является вероятность сохранения боевой (функциональной) способности по выполнению боевой (функциональной) задачи. При одном ударе расчетного средства поражения ( $n = 1$ ) применяется показатель  $Q_{(1)}$ , а при воздействии расчетного наряда средств поражения ( $n > 1$ ) применяется показатель  $Q$ .

В случае воздействия ОСП для оценки живучести применяется зависимость вероятности обратного события (от события – вероятности поражения) в форме распределения Релея (при следующих ограничениях: однократное воздействие средства поражения, пренебрежение при многократном воздействии влиянием накопления физического ущерба, отсутствие систематической ошибки прицеливания ОСП, применение ступенчатого (единичного) закона поражения цели и преобразование реальной цели в круговую цель):

$$Q = Q_{(1)}^n = e^{-\beta n}, \quad (4)$$

- где  $Q_{(1)}^n$  – живучесть (вероятность сохранения функциональной способности) МЗК при однократном воздействии ОСП;  
 $n$  – расчетный наряд средств поражения;  
 $\beta$  – уязвимость МЗК, которая вычисляется по формуле:

$$\beta = \ln \left( 1 - P_{бз(сн)} \right). \quad (5)$$

В свою очередь показатель боевой эффективности расчетного средства поражения  $P_{бз(сн)}$  определяется выражением

$$P_{бз(сн)} = P_1 G_{n(1)}, \quad (6)$$

- где  $P_1$  – вероятность попадания ОСП в центр прицеливания объекта-цели;  
 $G_{n(1)}$  – закона поражения (условной вероятности поражения объекта-цели при условии попадания ОСП в объект-цель).

Под защищенностью мобильного комплекса понимается мера способности противодействовать поражающему воздействию совокупности расчетных поражающих факторов расчетного средства поражения противника или одного из видов техногенных аварий или стихийных бедствий.

Следует отметить, что в ряде случаев для отдельного элемента мобильно-защищенного комплекса применяется понятие стойкость, например, к определенному виду внутреннего оборудования СФС или определенному агрегату средства вооружения при сужении совокупного воздействия к воздействию какого-либо одного определенного поражающего фактора.

В качестве основного показателя защищенности мобильно-защищенного комплекса принимается степень защиты  $\Delta P_{\text{эз}}$  на расчетное воздействие ОСП противника.

Скрытность функционирования может характеризоваться вероятностью обнаружения мобильно-защищенного комплекса с учетом проведения мероприятий комплексной маскировки [5]:

$$P_{\text{об}(\mu r)j} = P_{\text{об}(\mu r)j} + (1 - P_{\text{об}(\mu r)j})P_{\text{об}(t)\mu r j}, \quad (7)$$

- где  $P_{\text{об}(\mu r)j}$  – элементарная вероятность обнаружения цели  $j$ -го типа при применении средства маскировки  $\mu$ -го типа техническим средством разведки противника  $r$ -го вида;
- $P_{\text{об}(\mu r)j}$  – пороговая вероятность демаскирования цели  $j$ -го типа;
- $P_{\text{об}(t)\mu r j}$  – вероятность обнаружения цели  $j$ -го типа в период времени  $t$ .

Понятие оперативность трактуется как необходимое время для выполнения боевой (функциональной) задачи в соответствии с существующими нормативами.

В качестве показателя эффективности противодействия угрозам безопасности информационных систем управления комплекса может быть принята вероятность [6]

$$P(\tau_{(p)} \leq \tau_{(нд)}) = 1 - (\tau_{(нд)} < \tau_{(пд)}) = 1 - \int_0^{\tau_{(p)}} f_{(нд)}(z) dz, \quad (8)$$

- где  $\tau_{(p)}$  – время реализации функций реагирования на угрозу информационной безопасности;
- $\tau_{(нд)}$  – время противоправных действий по отношению к объекту в результате нарушения состояний защищенности информации.

Кроме тактико-технических требований к базированию МЗК предъявляются эксплуатационно-технические требования (ЭТТ) и общестроительные требования (ОСТ).

В общем виде эксплуатационно-технические требования имеют состав по обеспечению норм и правил эксплуатации специального оборудования систем вооружения и специальных фортификационных сооружений, а также другого инженерно-строительного оборудования боевых и технических позиций комплекса.

Общестроительные требования касаются в большей степени инженерного оборудования позиций мобильно-защищенного комплекса (средств фортификационной защиты и инженерно-строительного оборудования).

## ВЫВОД

Для более детального обоснования тактико-технических, эксплуатационно-технических и общестроительных требований к базированию мобильно-защищенных комплексов требуются дополнительные научно-методические разработки по обоснованию расчетного наряда средств поражения в зависимости от функционально-боевого предназначения комплекса, а также мероприятий маскировки и фортификации для повышения живучести рассматриваемых комплексов до требуемого уровня.

### Список используемых источников

1. О проблеме уязвимости мобильных ракетных комплексов // Армейский вестник. – URL: <https://army-news.ru/2013/07/o-probleme-uyazvimosti-mobilnyh-raketnyh-kompleksov> (дата обращения: 05.03.2020).
2. Сурин Д. В., Стахно Р. Е., Шевчук А. М. Теория моделирования воздействия обычных средств поражения противника на объекты наземных комплексов // Информационный сборник АВН (Санкт-Петербургское отделение). – 2005. – № 3. – С. 93–98.
3. Сурин Д. В., Толмачев С. А., Шевчук А. М. Обоснование облика и основных тактико-технических характеристик мобильно-защищенного РКК // Информационный сборник АВН (Санкт-Петербургское отделение). – 2004. – № 2. – С. 23–26.
4. Сурин Д. В. Специальные фортификационные сооружения: учебник. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2010. – 429 с.
5. Инженерное обеспечение выполнения задач Космическими войсками: учебник / Д. В. Сурин [и др.]. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2001. – 110 с.
6. Зарубин С. В., Ходырев Т. Б. К вопросу о показателе эффективности противодействия угрозам безопасности информационных систем управления // Охрана, безопасность, связь. – Воронеж: Воронежский институт МВД РФ, 2017. – № 1-1. – С. 112–115.

Б. П. Лебедь;  
С. А. Толмачёв,  
*кандидат военных наук, доцент;*  
А. М. Шевчук,  
*кандидат технических наук, доцент*

## **ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К МАСКИРОВКЕ ВОЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ НАЛИЧИЯ ВЫНОСНЫХ ОРИЕНТИРОВ ПРИЦЕЛИВАНИЯ**

В статье представлен методический подход по обоснованию требований по маскировке выносных ориентиров прицеливания высокоточного оружия противника при применении его по точечным и малым объектам-целям военного назначения. Предложен аналитический метод прогнозирования вероятности поражения объекта-цели при прицеливании боеприпасов высокоточного оружия по вынесенным ориентирам с учетом мероприятий по маскировке выносных ориентиров прицеливания. Указаны перспективы дальнейших исследований в направлении усовершенствования разработанного аналитического метода.

Ключевые слова: военные объекты, маскировка, высокоточное оружие, выносные ориентиры прицеливания.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Еще в девятнадцатом веке император Франции Наполеон I писал: «Война состоит из непредусмотренных событий» [1] и был прав – использование в вооруженной борьбе военной хитрости и маскировки уже тогда стало одной из основ достижения победы в бою.

Основной тенденцией настоящего времени по повышению живучести военных объектов стало создание новых средств маскировки и способов их применения. Это особенно актуально для объектов, представляющих собой стационарные войсковые фортификационные сооружения долговременного использования, степень защиты и расположение которых заранее известно противнику и по которым постоянно осуществляется контроль воздушными и космическими средствами разведки.

Применение средств скрытия и имитации на указанных выше военных объектах при возможном воздействии по ним высокоточного оружия (ВТО) противника при определенных условиях может иметь низкую эффективность. Это связано с тем, что прицеливание боеприпаса системой наведения ВТО может осуществляться не только по демаскирующим признакам, присущим непосредственно самому объекту-цели, но и по так называемым выносным ориентирам прицеливания (ВОП). Выносные ориентиры прицеливания – это хорошо различаемые и не изменяющиеся в течение продолжительного периода времени объекты искусственного и естественного происхождения, относительно которых противник может определить место расположения военного объекта даже при его скрытии. К ВОП также можно отнести отдельные элементы и самого объекта, которые в силу их физических характеристик невозможно скрыть или симитировать.

### **ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СКРЫТИЮ ВЫНОСНЫХ ОРИЕНТИРОВ ПРИЦЕЛИВАНИЯ ВТО ПРОТИВНИКА**

Для введения противника в заблуждение о наличии, составе, положении и предназначении военных объектов (ВО) проводятся мероприятия по их маскировке следующими основными способами: скрытием, имитацией, демонстративными действиями с применением дезинформации по различным каналам, а также их сочетанием.

В качестве военных объектов-целей ВТО противника в настоящей статье рассматриваются точечные и малые объекты-цели, которые можно характеризовать параметром, представляющим собой приведенный радиус цели  $\bar{R}_ц$ , который определяется зависимостью

$$\bar{R}_ц = \frac{R_ц}{R_п}, \quad (1)$$

где  $R_ц$  – условный радиус объекта-цели,

$$R_ц = \sqrt{\frac{F_ц}{\pi}}, \quad (2)$$

здесь  $F_ц$  – площадь объекта-цели;

$R_п$  – радиус зоны поражения объекта-цели боеприпасом ВТО.

Таким образом, под точечными объектами-целями понимаем объекты с  $\bar{R}_ц \geq 0,2$ .

К малым целям относим объекты-цели, для которых наибольший размер (длина)  $L$  не превосходит характерный наименьший размер (ширину)  $B$  более чем в 4 раза, а приведенный радиус цели находится в пределах  $0,2 < \bar{R}_ц \leq 1$ .

Рассматривая в качестве основного варианта маскировки – скрывание, сформулируем требования по маскировке ВОП.

1. В связи с тем, что зоны маскировки ВО и близлежащих к нему выносных ориентиров прицеливания должны перекрываться (рис. 1), необходимо скрывать военный объект и ВОП единым маскировочным покрытием (маской), размеры которого(ой) выбираются с учетом обеспечения необходимого разнеса центра объекта-цели и центра маскировочного покрытия, который будет являться центром прицеливания ( $Ц_M$ ) боеприпаса ВТО противника (рис. 2).

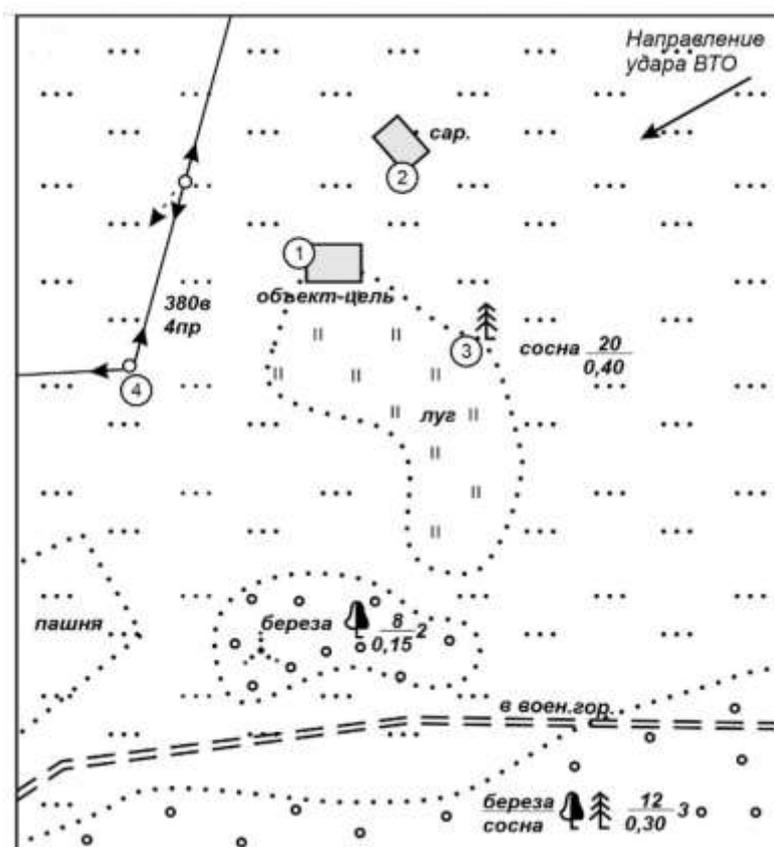


Рис. 1. Схема участка местности с нанесенными на ней зонами маскировки военного объекта и выносных ориентиров прицеливания:  
1 – объект-цель для воздействия ВТО противника; 2, 3, 4 – выносные ориентиры прицеливания (сарай, одиноко стоящее дерево, угол поворота ЛЭП)

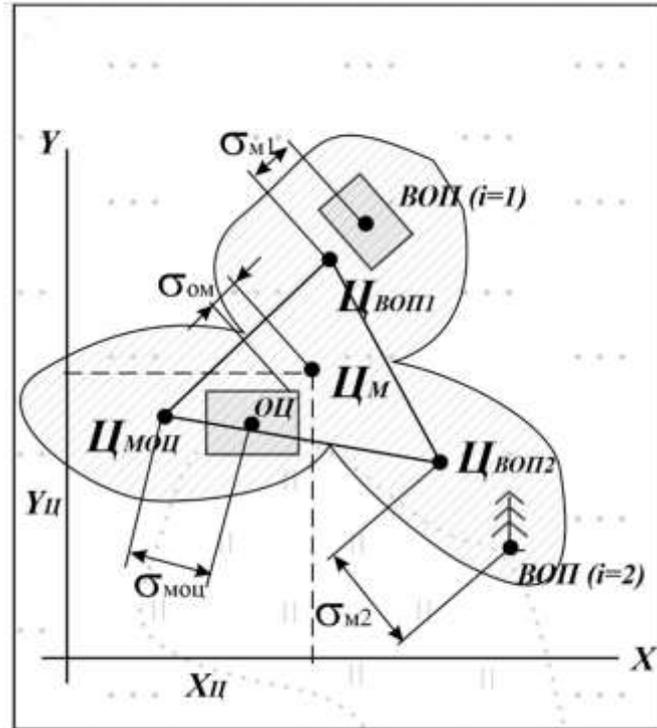


Рис. 2. Расчетная схема размещения масок военного объекта и выносных ориентиров прицеливания ВТО:

$\text{Ц}_M$  – центр общей маски;  $\text{Ц}_{\text{МОЦ}}$ ,  $\text{Ц}_{\text{ВОП1}}$ ,  $\text{Ц}_{\text{ВОП2}}$  – центры масок объекта-цели и выносных ориентиров прицеливания 1 и 2 соответственно

2. По плановым фотоснимкам или топографической схеме незамаскированного участка местности определяются наиболее заметные ВОП с наименьшим размером  $B$ , в два раза превышающим разрешающую способность авиационных средств разведки противника ( $R_r$ ), и находящиеся на удалении до 10 размеров длины военного объекта ( $10L_{ц}$ ) от маскируемого военного объекта (например, для варианта, представленного на рис. 1, это ВОП с номерами 2 и 3).

Необходимую площадь маскировочного покрытия каждой  $i$ -й ВОП предлагается определять по следующей формуле:

$$F_{\text{мвоп}(i)} = \left( 2 \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_p^2 + \sigma_b^2 - 0,02 \times R_{\text{воп}(i)}^2} + \sqrt{F_{\text{воп}(i)}} \right)^2, \quad (3)$$

- где  $R_{\text{воп}(i)}$  – расстояние от  $i$ -й ВОП до объекта, м ( $R_r < R_{\text{воп}(i)} \leq 10L_{ц}$ );  
 $F_{\text{воп}(i)}$  – площадь изображения  $i$ -й ВОП в плоскости, перпендикулярной направлению наблюдения разведывательными средствами противника (определяется по результатам априорного фотоконтроля), м<sup>2</sup>;  
 $\sigma_c$  – предполагаемое среднее квадратическое отклонение определения местоположения самолета противника с помощью навигационной системы (точность выхода самолета-разведчика на объект разведки), м;  
 $\sigma_p$  – среднее квадратическое отклонение определения местоположения объекта атаки при предварительной разведке местности противником, м;  
 $\sigma_b$  – среднее квадратическое отклонение наведения боеприпаса, м.

3. Для того чтобы под маской ВОП не просматривалась необходимо, чтобы центр ее маски был смещен относительно центра на расстояние  $\sigma_m$ , которое предлагается определять по формуле

$$\sigma_{m(i)} = 0,5(\sqrt{F_{\text{мвоп}(i)}} - \sqrt{F_{\text{воп}(i)}}). \quad (4)$$

В случае размещения маски с расчетной площадью  $F_{\text{мвоп}(i)}$  с центром, смещенным на расстояние  $\sigma_{\text{м}(i)}$ , при скрытии ВОП противник не сможет использовать ее в качестве точки прицеливания.

4. Для реализации первого требования по объединению масок объекта-цели и ВОП определяется площадь общего маскировочного покрытия (маски)  $F_{\text{ом}}$  по формуле

$$F_{\text{ом}} = \left( 2\sqrt{\sigma_{\text{с}}^2 + \sigma_{\text{р}}^2 + \sigma_{\text{б}}^2} + \sqrt{F_{\text{ц}}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n F_{\text{мвоп}(i)}. \quad (5)$$

5. Расположение центра общей маски определяется как геометрический центр дискретного множества точек евклидова пространства фигуры, образованной центрами масок объекта-цели и выносных ориентиров прицеливания.

В связи с тем, что фигура, образованная центрами масок объекта-цели и выносных ориентиров прицеливания, может быть не простой (например, при  $i \geq 5$ ), для определения координат центра предлагается использовать метод, когда сложные сечения делятся на несколько простых частей (например, треугольников), положение геометрических центров (центров тяжести) которых легко определить [2, 3]. Таким образом:

- разбиваем сложное сечение на простые части, для которых центры тяжести известны;
- выбираем оси координат (при этом необходимо помнить, что если фигура имеет ось симметрии, то ее центр тяжести лежит на этой оси; если фигура имеет центр симметрии, то ее центр тяжести совпадает с центром симметрии);
- определяем координаты центров тяжести отдельных частей относительно выбранных осей;
- используя следующие формулы, определяем искомые координаты центра тяжести рассматриваемой сложной фигуры:

$$X_{\text{ц}} = \frac{\sum_{j=1}^m F_{\text{оч}(j)} X_{\text{оч}(j)}}{\sum_{j=1}^m F_{\text{оч}(j)}}; \quad (6)$$

$$Y_{\text{ц}} = \frac{\sum_{j=1}^m F_{\text{оч}(j)} Y_{\text{оч}(j)}}{\sum_{j=1}^m F_{\text{оч}(j)}},$$

где  $F_{\text{оч}(j)}$  – площади отдельных частей сложной фигуры, состоящей из  $j = 1(m)$  частей;

$X_{\text{оч}(j=1(m))}$ ,

$Y_{\text{оч}(j=1(m))}$  – координаты центра тяжести простых отдельных частей.

6. При неудачном размещении масок объекта-цели и ВОП существует вероятность, когда центр общей маски может попасть в зону поражения объекта-цели. Поэтому на следующем шаге проверяем условие:

$$\sigma_{\text{ом}} \geq R_{\text{п}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{ом}}$  – расстояние от объекта-цели до центра общей маски, м. Если условие не выполняется, производится перекомпоновка масок объекта-цели и ВОП и расчет повторяется снова.

7. В связи с тем, что в качестве ВОП могут быть использованы характерные особенности отдельных элементов военного объекта, элементы рельефа и фона, необходимо при одновременной подготовке к воздействию противника устранить контраст ориентиров с фоном путем выравнивания неровностей рельефа местности вокруг объекта с использованием инженерных средств, а также устранить подобного вида ВОП с помощью штатных и подручных средств маскировки.

8. Эффективность результата реализации требований 1–6 проверяется путем проведения оперативно-тактических расчетов по оцениванию вероятностей поражения военного объекта-цели в зависимости от его защищенности, типа, применяемого противником средства по-

ражения (боеприпаса ВТО), размеров маскировочных покрытий, их размещения относительно маскируемых элементов и мест размещения ложных объектов (при их наличии).

### МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА-ЦЕЛИ ПРИ ПРИЦЕЛИВАНИИ БОЕПРИПАСОВ ВЫСОКОТОЧНОГО ОРУЖИЯ ПО ВЫНЕСЕННЫМ ОРИЕНТИРАМ

Вероятность поражения объекта-цели при прицеливании по вынесенным ориентирам определяется по формуле

$$P_{\text{пор}} = 1 - e^{-\omega_r \left( \frac{R_{\text{п}}^2}{2(\sigma_{\text{мп}}^2 + \sigma_{\text{кво}}^2)} \right)}, \quad (8)$$

где  $\omega_r$  – коэффициент обзорности цели;  
 $\sigma_{\text{кво}}$  – круговое вероятное отклонение боеприпаса, м;  
 $\sigma_{\text{мп}}$  – среднеквадратическое отклонение определения местоположения замаскированного объекта-цели с учетом ВОП, м:

$$\sigma_{\text{мп}} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_p^2 + \sigma_6^2 + \sigma_m^2}. \quad (9)$$

Коэффициент обзорности объекта-цели при применении ТСР  $r$ -го вида  $\omega_r$ , характеризующий возможность разведки «увидеть» объект, может быть определен по зависимости [4]:

$$\omega_r = 3,5\varphi_r \sqrt{\frac{R_r}{R_o}}, \quad (10)$$

где  $\varphi_r$  – коэффициент благоприятности проведения разведки (учитывает природные и искусственные факторы – прозрачность атмосферы, время суток, погодные условия и т. д.);  
 $R_r$  – разрешающая способность ТСР  $r$ -го вида;  
 $R_o$  – условный радиус замаскированного объекта.

Коэффициент благоприятности условий проведения разведки зависит от множества природных и искусственных (техногенных) факторов и может определяться по следующей зависимости:

$$\varphi_r = \prod_{\gamma=1}^6 \varphi_{r(\gamma)}, \quad \gamma = 1(1)6, \quad (11)$$

где  $\varphi_{r(1)}$  – коэффициент благоприятности погодных условий ( $\gamma = 1$ );  
 $\varphi_{r(2)}$  – коэффициент благоприятности времени суток ( $\gamma = 2$ );  
 $\varphi_{r(3)}$  – коэффициент сезонности ( $\gamma = 3$ );  
 $\varphi_{r(4)}$  – коэффициент условий расположения на местности ( $\gamma = 4$ );  
 $\varphi_{r(5)}$  – коэффициент рельефа местности ( $\gamma = 5$ );  
 $\varphi_{r(6)}$  – коэффициент атмосферных условий ( $\gamma = 6$ );

После расчета вероятности поражения объекта-цели расчетными типами управляемых авиационных бомб и ракет при всех возможных способах прицеливания проводится анализ, на основе которого оценивается эффективность средств скрытия по худшему для нас варианту воздействия. В результате чего определяется максимальная вероятность поражения объекта-цели наиболее опасным типом управляемого боеприпаса и делаются выводы по проведению дополнительных маскировочных мероприятий, например, по использованию ложных объектов целей, выносных ориентиров прицеливания, искусственных атмосферных образований, дымов и аэрозолей и т. п.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные выше требования к мероприятиям скрытия военных объектов позволяют на новом – качественном уровне проводить маскировку точечных и малых объектов-целей ВТО, а методический аппарат оценки вероятности поражения замаскированных объектов – осуществлять априорное прогнозирование эффективности проведенных мероприятий. Вместе с тем, считаем, что дальнейшие исследования по маскировке военных объектов-целей и выносных ориентиров прицеливания боеприпасов высокоточного оружия могут быть направлены на развитие математического аппарата, который был бы рассчитан не только на точечные и малые объекты, но и линейные и площадные, а также учитывал отдельно расположенные от основной маски скрытые ВОП.

Кроме того, представленный аналитический метод прогнозирования вероятности поражения объекта-цели при прицеливании боеприпасов высокоточного оружия по вынесенным ориентирам не учитывает еще одного способа маскировки – имитацию.

### Список используемых источников

1. Душенко К. В. Большая книга афоризмов. – Изд. 5-е, испр. – М.: Изд-во ЭКСМО-Пресс, 2001. – 1056 с.
2. Гашков С. Б. Центры тяжести и геометрия. – М.: МЦНМО, 2015. – 64 с.
3. Цыпкин А. Г., Цыпкин Г. Г. Математические формулы. Алгебра. Геометрия. Математический анализ: справочник. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1985. – 128 с.
4. Сурин Д. В. Инженерное обеспечение выполнения задач космическими войсками: учебник. – СПб.: ВИКУ имени А. Ф. Можайского, 2001. – 314 с.

А. Н. Миронов,  
*доктор технических наук, профессор;*  
Т. Н. Солдатенко

## **МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОГО РИСКА СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ**

Рассматривается модель стратегии технической эксплуатации стартового сооружения, параметры которой определяются на основе решения задачи оптимизации по критерию минимального риска аварии конструкций сооружения. Состояния модели соответствуют категориям технического состояния, установленным нормативными документами. Значения уровней риска аварии каждой конструкции определяются на основе оценок уровня их поврежденности. Показано, что предложенный подход позволяет получить значительный выигрыш по значению риска стартового сооружения. Приведен расчетный пример.

Ключевые слова: риск аварии сооружения, коэффициенты критичности, категория технического состояния, уровень поврежденности строительной конструкции, критерий оптимальности.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Стартовые сооружения представляют собой важную составную часть наземной космической инфраструктуры. Для поддержания стартовых сооружений в работоспособном состоянии применяется техническая эксплуатация (ТЭ). В данной работе под технической эксплуатацией понимается совокупность осмотров, обследований и ремонтов стартового сооружения установленных видов. Интервалы между мероприятиями технической эксплуатации и состав их операций определяются категориями технических состояний конструкций сооружения. Состав данных категорий установлен нормативными документами [1, 2].

Характерной особенностью рассматриваемых объектов является высокий уровень износа. Некоторые из них близки к выработке своего срока службы. Поэтому возрастают затраты на операции технической эксплуатации, уменьшаются интервалы между обследованиями конструкций. Такое положение требует поисков новых подходов к организации технической эксплуатации стартовых сооружений [3, 4].

Одним из быстро развивающихся направлений в области эксплуатации сложных систем является применение риск-ориентированного подхода. Основной особенностью обслуживания, проводимого в соответствии с данным подходом, является учет не только текущего технического состояния объекта, но и последствий от его отказа при применении по назначению. Это позволяет сосредоточить основные усилия на обеспечение работоспособности тех элементов, которые имеют наибольшие риски аварий и масштабов ущерба при функционировании рассматриваемых объектов. В настоящее время основными видами обслуживания зданий и сооружений являются обслуживание по ресурсу и по состоянию [2]. При этом первый из указанных видов технической эксплуатации представляет собой плановое обслуживание с планированием мероприятий по ресурсу (сроку службы) конструкций, а второй – плановое обслуживание с планированием мероприятий по фактическим значениям параметров технического состояния конструкций зданий (сооружений). Применяемые виды обслуживания не учитывают последствия от аварий отдельных конструкций.

В данной работе рассматривается актуальный подход к обоснованию технической эксплуатации стартового сооружения, позволяющий принимать во внимание не только текущее техническое состояние конструкций, но и масштабы ущербов от их аварий.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Введем понятие стратегии технической эксплуатации, под которой будет далее рассматриваться совокупность правил обоснования и выполнения операций технической эксплуатации конструкций стартового сооружения. Параметрами стратегии технической эксплуатации стартового сооружения являются интервалы между мероприятиями и состав операций технической эксплуатации указанных сооружений. При определении параметров стратегии ТЭ будем учитывать уровни рисков аварий конструкций и ущербы, которые возможны при этих событиях. Учет «вклада» в риск стартового сооружения отдельных его элементов особенно важен в ситуациях, когда необходимо за сравнительно короткий интервал времени осуществить несколько запусков космических аппаратов с заданной частотой. Сформулируем содержательную постановку решаемой задачи. Заданы следующие исходные данные:

- необходимое количество циклов запуска космических аппаратов (КА);
- оценки показателей долговечности и безотказности конструкций стартового сооружения на начало рассматриваемого интервала запусков КА;
- экономические и временные показатели операций технической эксплуатации конструкций стартового сооружения;
- приемлемый уровень риска аварии стартового сооружения.

Требуется обеспечить заданное количество запусков КА с требуемой частотой и приемлемым уровнем риска на основе:

- 1) обоснования решений по составу операций ТЭ конструкций стартового сооружения, оптимальному по минимуму их риска на заданном количестве циклов запусков КА с требуемой частотой их выполнения;
- 2) использования прогнозных оценок риска конструкций стартового сооружения на интервале заданного количества запусков КА;
- 3) обоснования ресурсов для обеспечения параметров риск-ориентированной стратегии ТЭ стартового сооружения при заданном количестве запусков КА, выполняемых с требуемой частотой.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАРТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

Будем рассматривать процесс ТЭ как последовательность переходов технического состояния конструкции. Дано: стартовое сооружение состоит из  $N$  конструкций, каждая из которых может находиться в четырех состояниях, установленных для зданий и сооружений [1]. Для каждой конструкции определено:

$\mathbf{E} = \{e_i\}$  – множество состояний модели технической эксплуатации (ТЭ) конструкции, соответствующих установленным для конструкции категориям технических состояний;

$\tau_{lij}$  – затраты времени на переход из  $i$ -го состояния в  $j$ -е состояние при выполнении операции технической эксплуатации  $l$ -й конструкции,  $l = 1(1)N$ ;

$c_{lij}$  – затраты средств на переход из  $i$ -го состояния в  $j$ -е состояние при выполнении операции технической эксплуатации  $l$ -й конструкции,  $l = 1(1)N$ ;

$\mathbf{U} = \langle u_l \rangle$  – вектор ущербов при аварийных ситуациях конструкций  $l = 1(1)N$ ;

$t_k$  – длительность одного цикла подготовки запуска КА ВН, установленная БГ,  $k = 1(1)K$ ;

$C^{(БГ)}$  – допустимые затраты средств для запусков  $K$  космических аппаратов в соответствии с БГ;

$\mathbf{X} = [x_{lijk}]$  – матрица индикаторов принятия решения о выборе операций технической эксплуатации;

$T_k^{(TЭ)}(\mathbf{X})$  – расчетные затраты времени на операции технической эксплуатации стартового сооружения на каждом цикле запуска  $t_k$ , установленном БГ,  $k = 1(1)K$ ;

$C^{(TЭ)}(\mathbf{X})$  – расчетные затраты средств на операции ТЭ стартового сооружения на всех циклах запусков КА;

$p_l^{(AC)}(t_k, \mathbf{X})$  – вероятность аварии (уровень риска)  $l$ -й конструкции на интервале  $t_k$ ,  $k = 1(1)K$ ;

$R(t^{(TЭ)}, \mathbf{X})$  – риск аварийной ситуации (уровень риска аварии) для стартового сооружения за интервал  $t^{(TЭ)} = K \cdot t_k$ ;

$P^{(приемл)}$  – приемлемый уровень риска аварийной ситуации сооружения.

Необходимо определить параметры стратегии технической эксплуатации стартового сооружения:

$$Str_{TЭ} = \{ \langle t_k, V_k \rangle \}. \quad (1)$$

Здесь  $V_k$  – состав операций технической эксплуатации для интервала  $t_k$ :

$$V_k = \sum_{l=1}^N v_{lk}, \quad (2)$$

где  $v_{lk} = \langle c_{lij}, \tau_{lij} \rangle$ ;  $k = 1(1)K$ .

Для  $K$  циклов запусков КА с требуемой частотой определить матрицу  $\mathbf{X}^*$  индикаторов принятия решений по технической эксплуатации, для которой выполняются условия:

$$\mathbf{X}^* = \arg \min_{\mathbf{X} \in \Delta_\zeta} R(t_k, \mathbf{X}), \quad (3)$$

$$\Delta_\zeta = \{ \Delta \mid T_k^{(TЭ)}(\mathbf{x}) \leq T^{(БГ)}, C^{(TЭ)}(\mathbf{x}) \leq C^{(БГ)}, P^{(AC)}(t) \leq P^{(приемл)}, x_{lijk} \in \{0, 1\}, l = 1(1)N, i = 1(1)N, j = 1(1)n, k = 1(1)K \}. \quad (4)$$

При этом множество четырех состояний  $E = \{e_i\}$   $i = 1(1)4$  соответствует категориям технического состояния конструкции, которые установлены нормативно [1]. Этими категориями являются следующие: нормативное техническое состояние, работоспособное техническое состояние, ограниченно-работоспособное техническое состояние, аварийное состояние. Рассмотрим расчетные соотношения для показателей, используемых в соотношениях (3) и (4).

Выражение для риска аварии стартового сооружения имеет следующий вид:

$$R(t^{(TЭ)}, \mathbf{X}) = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^K p_l^{(AC)}(t_k, \mathbf{X}) \cdot u_l \cdot \alpha_l, \quad (5)$$

где  $\alpha_l$  – коэффициент критичности конструкций стартового сооружения,  $l = 1(1)N$ ;

$p_l^{(AC)}(t_k, \mathbf{X})$  – вероятность аварийной ситуации  $l$ -й конструкции за время  $t_k$   $k$ -го цикла запуска КА.

Длительность  $T_k^{(TЭ)}(\mathbf{X})$  времени на выполнение операций, предусмотренных вариантом  $\mathbf{X}$  их состава (для  $k$ -го цикла запуска КА):

$$T_k^{(TЭ)}(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \tau_{lij} \cdot x_{lijk}; \quad (6)$$

$$\tau_{lij} = \tau_l^{(конг)} + \tau_{lij}^{(прв)}, \quad (7)$$

где  $\tau_l^{(\text{конт})}$  – длительность выполнения контроля технического состояния  $l$ -й конструкции стартового сооружения;  
 $\tau_{lij}^{(\text{прв})}$  – длительность выполнения работ по ремонту  $l$ -й конструкции стартового сооружения для перевода из  $i$ -й категории в  $j$ -ю категорию технического состояния.

Объем затрат средств  $C^{(\text{ТЭ})}(\mathbf{X})$  на выполнение операций, предусмотренных вариантом  $\mathbf{X}$  их состава (для всех циклов запуска КА):

$$C^{(\text{ТЭ})}(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K c_{ijk} \cdot x_{ijk}; \quad (8)$$

$$c_{ijk} = c_l^{(\text{конт})} + c_{ijk}^{(\text{прв})}, \quad (9)$$

где  $c_l^{(\text{конт})}$  – стоимость выполнения контроля технического состояния  $l$ -й конструкции стартового сооружения;  
 $c_{ijk}^{(\text{прв})}$  – стоимость выполнения работ по ремонту  $l$ -й конструкции стартового сооружения для перевода из  $i$ -й категории в  $j$ -ю категорию технического состояния.

Вероятность аварии  $p_l^{(\text{AC})}(e_i)$  конструкции, находящейся в состоянии  $e_i$  на интервале  $t_k$  запуска КА (при предположении, что запас прочности конструкции имеет нормальный закон распределения) [5]

$$p_l^{(\text{AC})}(e_i) = \Phi(-\beta_l(e_i)), \quad (10)$$

где  $\beta_l(e_i)$  – индекс надежности при нахождении конструкции в состоянии  $e_i$  ( $l=1(1)N$ ,  $i=1(1)4$ );  
 $\Phi(\cdot)$  – функция Лапласа.

Значения коэффициентов критичности  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$  конструкций стартового сооружения рассчитываются на основе рейтинга критичности с помощью соотношения Фишберна по формуле [6]

$$\alpha_l = \frac{2 \cdot (N - d_l + 1)}{N \cdot (N + 1)}, \quad l = 1(1)N. \quad (11)$$

Сформулированная задача определения оптимального по критерию минимального риска состава  $\mathbf{X}^*$  операций технической эксплуатации конструкций стартового сооружения относится к классу задач булева программирования [7]. В данной работе она решена методом ветвей и границ с помощью надстройки «Поиск решения» пакета *MS-Excel*.

В расчетном примере рассматриваются 10 конструкций стартового сооружения. Для каждой конструкции выполнена сметная оценка показателей операций технической эксплуатации. Значение приемлемого риска установлена равной 0,03. С данного стартового сооружения необходимо выполнить 6 запусков КА с заданной частотой.

Определить параметры оптимальной по минимуму риска стратегии технической эксплуатации для интервала запусков.

Решение задачи. При решении задачи использована описанная выше модель, а также данные сметного оценивания необходимых операций технической эксплуатации рассматриваемых конструкций стартового сооружения. Для сравнительного анализа действующей и предложенной стратегий технической эксплуатации получены оценки значений рисков стартового сооружения. Они представлены в графической форме на рис. 1.

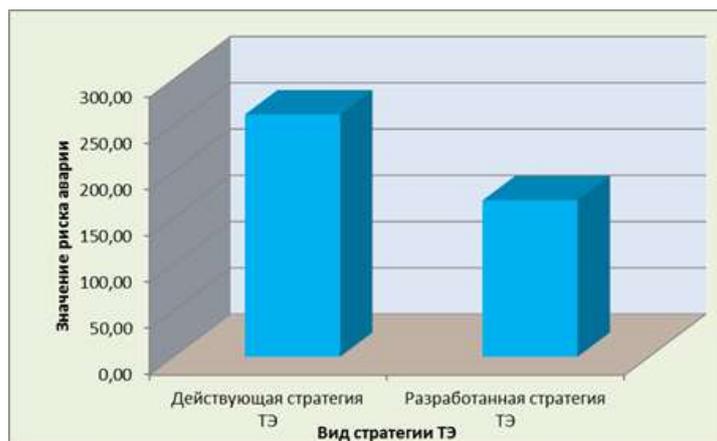


Рис. 1. Значения рисков стартового сооружения для двух стратегий (в тыс. руб.)

Результаты расчетов показали, что применение разработанной стратегии технической эксплуатации позволит снизить риск стартового сооружения почти на 40%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрена актуальная задача формирования риск-ориентированной стратегии технической эксплуатации стартового сооружения. В работе обоснован подход к формированию указанной стратегии, обоснованы необходимые расчетные соотношения. Практическая значимость полученной модели состоит в возможности ее использования для обоснования операций технической эксплуатации с учетом рисков стартового сооружения.

## Список используемых источников

1. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [введ. 2014-01-01]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 54 с.
2. СП 255.1325800.2016. Свод правил. Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139958> (дата обращения: 02.02.2022).
3. Мельчаков А. П., Байбурин Д. А., Казакова Е. А. Конструкционная безопасность строительного объекта: оценка и обеспечение : учеб. пособие. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 136 с.
4. Математическая модель расчета показателей надежности системы контроля заправки ракеты космического назначения / Е.В. Басотин [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 10-2. – С. 254–258.
5. ГОСТ Р ИСО 2394–2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. – М.: Стандартинформ, 2016. – 62 с.
6. Солдатенко Т.Н., Миронов А.Н., Солдатенко В.С. Модель и методика нечеткого ранжирования факторов деловой репутации подрядчика при эксплуатации инфраструктуры наземных комплексов // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. – 2018. – Вып. 663. – С. 192–196.
7. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений: учеб. пособие. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 408 с.

Д. С. Старчуков,  
кандидат технических наук, доцент;  
А. М. Сычева,  
доктор технических наук, доцент

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ЗОЛЬСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ

Анализ опыта эксплуатации специальных сооружений ракетно-космических комплексов показывает, что высокопрочные бетоны, применяемые в них, имеют существенные недостатки, значительно снижающие конечную долговечность. В статье предлагается использовать новые высокопрочные бетоны с высокими показателями качества, достигаемыми за счет модифицирования зольсодержащими растворами. Представлена разработанная концептуальная модель прогнозирования показателей качества высокопрочных бетонов, позволяющая выбирать технологию их модифицирования. Предложены формулы расчета новых свойств высокопрочного бетона.

Ключевые слова: долговечность, воинские здания, специальные сооружения, система технической эксплуатации.

### ВВЕДЕНИЕ

При использовании зольсодержащих растворов (ЗСР) появляется возможность повышения качества высокопрочных бетонов (ВПБ) (рис. 1) [1]. При новом строительстве получение ВПБ по существующим технологиям является энергозатратным (рис. 2), что не удовлетворяет современным нормативным требованиям.



Рис. 1. Новые свойства ВПБ

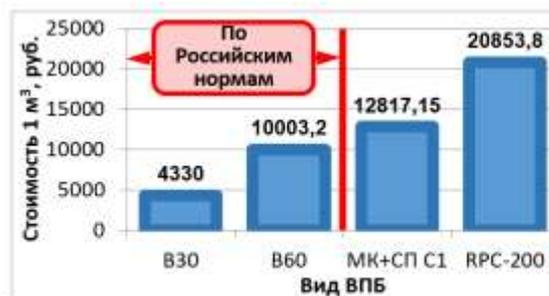


Рис. 2. Стоимость 1 м³ различных ВПБ

Поэтому исследования по созданию перспективных энергосберегающих технологий и методов получения ВПБ с новыми защитными свойствами, а также повышенной прочностью на сжатие, необходимой для специальных сооружений при их строительстве и реконструкции, являются актуальными [2]. Актуальным будет и создание концептуальной модели для учета новых свойств ВПБ и прогнозирования их вклада в повышение качества сооружений.

На сегодняшний день не известны:

- энергосберегающие методы получения ВПБ с новыми защитными свойствами, основанные на их поверхностном и объемном упрочнении коллоидными растворами, содержащими наночастицы золей  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  – зольсодержащими растворами (ЗСР) [3];

- теоретические положения, учитывающие вводимую поверхностную энергию наночастиц [4], позволяющую максимально реализовать резервы цемента в ходе реакций гидратации цемента и получить в результате этого новый высокопрочный бетон [5].

Получению ВПБ с повышенной ударопрочной поверхностью, коррозионной стойкостью, прочностью и улучшенными показателями качества на основе использования энергосберегающих технологий их поверхностного и объемного упрочнения ЗСР, а также созданию концептуальной модели, включающей новые уровни конструкционного материала и позволяющей оценивать вклад новых свойств ВПБ в повышение качества специальных сооружений, и посвящена данная статья.

### КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ЗОЛЬСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ

Концептуальная (содержательная) модель – это абстрактная модель, определяющая состав и структуру системы, свойства элементов и причинно-следственные связи, присущие системе и существенные для достижения цели моделирования.

Как известно, в разработке модели условно выделяют четыре этапа описания: концептуальный, математический, алгоритмический и программный.

На концептуальном этапе разработки модели выделяют следующие шаги:

- 1) определение и ориентация;
- 2) стратификация;
- 3) детализация;
- 4) локализация;
- 5) структуризация и управление;
- 6) выделение процессов;
- 7) отражение состояний.

Раскроем подробно каждый из них.

**1. Определение и ориентация.** Под общим процессом функционирования военнотехнической системы подразумевается способность противодействия СФС однократному воздействию средства поражения, что характеризуется его классами защиты от ЯСП и ОСП.

Технологии модифицирования, используемые для получения высокопрочных бетонов в данной работе, представлены на рис. 3 [6].



Рис. 3. Технологии модифицирования высокопрочных бетонов зольсодержащими растворами

В качестве раствора как для поверхностного, так и для объемного модифицирования высокопрочного бетона в данной работе впервые будут использованы различные пропиточные составы и добавки на основе частиц наноразмера – золи оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и гидроксида железа (III) ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) [7].

Необходимо отметить, что в случае поверхностной пропитки высокопрочного бетона зольсодержащими растворами у него появляется особый минеральный высокопрочный поверхностный слой (обойма), который не имеет поверхности раздела фаз с упрочняемым бе-

тонным ядром и является монолитным [8]. Такой слой будет улучшать свойства и несущую способность всей железобетонной конструкции в случае воздействия на нее различных разрушающих факторов.

При этом у конструкции могут появляться новые свойства, учет которых необходимо делать с помощью введения в существующие методы расчета соответствующих коэффициентов.

При поверхностном модифицировании высокопрочного бетона зольсодержащими растворами в процессе реконструкции сооружений под элементарным явлением подразумевается его физико-механическое упрочнение за счет образования монолитной минеральной обоймы, одновременно с которым повышается прочность  $R_b$ , твердость  $H$  и коррозионная устойчивость бетона  $k_{\text{корр}}$  в агрессивных (грунтовых) средах, а также и другие его свойства [9].

При объемном модифицировании высокопрочного бетона под элементарным явлением подразумевается физико-механическое упрочнение бетона, одновременно с которым повышается его прочность и другие физико-механические свойства.

Кроме этого, при поверхностном и объемном модифицировании бетона зольсодержащими растворами под элементарным явлением также подразумевается физико-химическое упрочнение бетона за счет внесения дополнительной поверхностной энергии наночастиц используемых золей.

Такой уровень упрочнения материала (микроуровень), с помощью которого можно управлять как свойствами высокопрочного бетона [10], так и защитными свойствами конструкции и СФС из него, в рамках единой концептуальной модели на сегодняшний день не рассматривался.

**2. Стратификация.** Уровни детализации называются стратами, а процесс выделения уровней – стратификацией. Обычно в модель включаются элементы одной страты. Но иногда представляет интерес построение модели из элементов разных страт.

В данной статье рассматривается четыре структурных уровня концептуальной модели:

1) уровень сооружения – уровень целевых показателей защищенности, на котором заданы нормативные характеристики современных ЯСП и ОСП,  $\Delta p_{\text{ф}}^{\text{норм}}$  и  $m_{\text{б.пр}}^{\text{норм}}$ , соответствующие заданным в проекте классам защиты СФС. Эти характеристики сравнивают с фактическими значениями  $\Delta p_{\text{ф}}^{\text{факт}}$  и  $m_{\text{б.пр}}^{\text{факт}}$ , полученными на основе расчетов и учитывающими как характеристики защитных конструкций ( $h_{\text{з.к(ЯСП)}}$  и  $h_{\text{з.к(ОСП)}}$ ), так и показатели качества конструкционного материала ( $R_b$ ,  $H_k$ ,  $k_{\text{обоймы}}$ ,  $k_M$ ,  $k_{\text{корр}}$ ,  $k_{\text{рик}}$ ), необходимые для устройства дополнительной фортификационной защиты при строительстве или реконструкции СФС;

2) уровень строительных конструкций – уровень показателей стойкости железобетонных конструкций, который включает расчет их толщин, необходимых для выдерживания эксплуатационной нагрузки. Кроме этого, уровень включает новые коэффициенты, предложенные в работе, уточняющие существующие методы расчета СФС и отражающие повышение несущей способности конструкций (коэффициент обоймы  $k_{\text{обоймы}}$ ) и снижение угла рикошета (коэффициент рикошета  $k_{\text{рик}}$ ) при поверхностном модифицировании бетона зольсодержащими растворами;

3) макроуровень высокопрочного бетона – уровень, на котором рассматриваются физико-механические свойства высокопрочных бетонов (прочность  $R_b$  и твердость  $H$ ), влияющие на повышение прочности и стойкости конструкций. Кроме этого, уровень включает разработанные коэффициенты, описывающие новые свойства бетона (коэффициент броневой защиты  $k_M$  и коэффициент коррозионной устойчивости  $k_{\text{корр}}$ ), получаемые в результате поверхностного модифицирования бетона зольсодержащими растворами;

4) микроуровень высокопрочного бетона – уровень составляющих материал компонентов (минералов и частиц), на котором рассматриваются физико-химические и энергетические показатели, влияющие на его физико-механические свойства.

Необходимо отметить, что в существующих на сегодняшний день методах расчета толщин строительных конструкций недостаточно учитывать только прочность для описания но-

вых свойств бетона, которые появляются при его поверхностном модифицировании зольсодержащими растворами.

**3. Детализация.** С учетом того, что в работе предложено четыре уровня концептуальной модели, ниже приводится детализация каждого из них.

На *первом уровне* основными выходными элементами являются ТТХ современных и перспективных средств поражения, задающие требования к целевым показателям – классам защиты СФС от ЯСП и ОСП,  $p_{\phi}^{\text{норм}}$  и  $m_{\text{б.пр}}^{\text{норм}}$ . На этом уровне входными характеристиками являются толщины защитных конструкций  $h_{\text{зк}}$ , рассчитанные на воздействие ЯСП и ОСП ( $h_{\text{зк(ЯСП)}}$  и  $h_{\text{зк(ОСП)}}$ ), позволяющие определить параметры  $\Delta p_{\phi}^{\text{факт}}$  и  $m_{\text{б.пр}}^{\text{факт}}$ , которые затем сравниваются с нормативными  $\Delta p_{\phi}^{\text{норм}}$  и  $m_{\text{б.пр}}^{\text{норм}}$  (рис. 4).

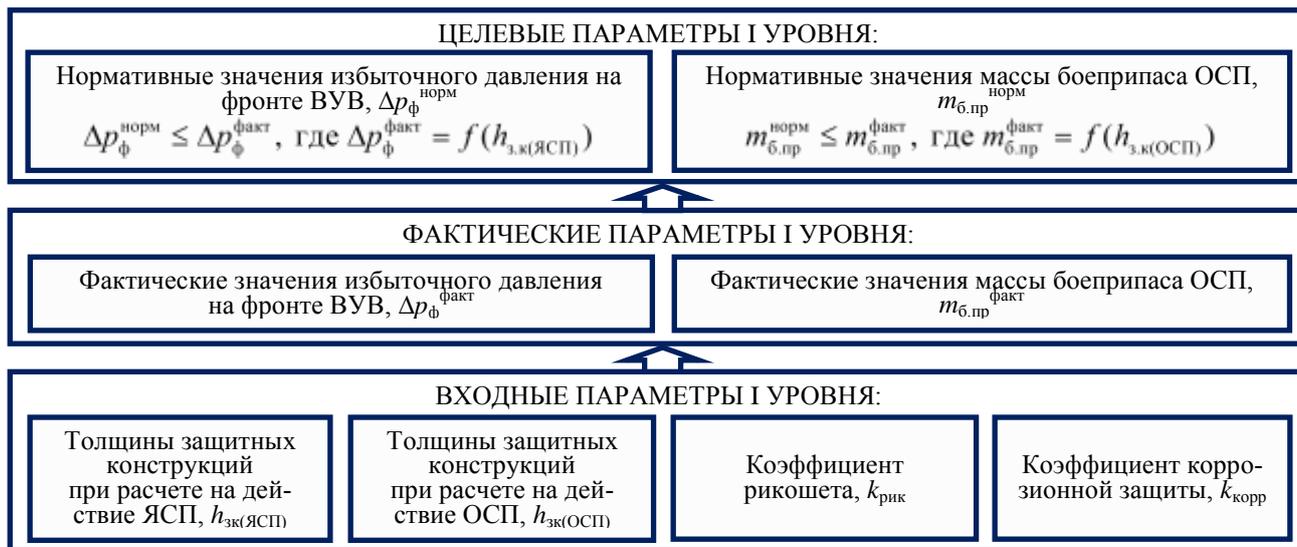


Рис. 4. Детализация взаимосвязей параметров I уровня модели

На *втором уровне* основными входными характеристиками являются прочность на сжатие разработанного высокопрочного бетона  $R_b$ , коэффициент броневой защиты  $k_M$ , который был введен благодаря новому свойству бетона – бронезащите, полученному в результате его поверхностного модифицирования зольсодержащими растворами (рис. 5).

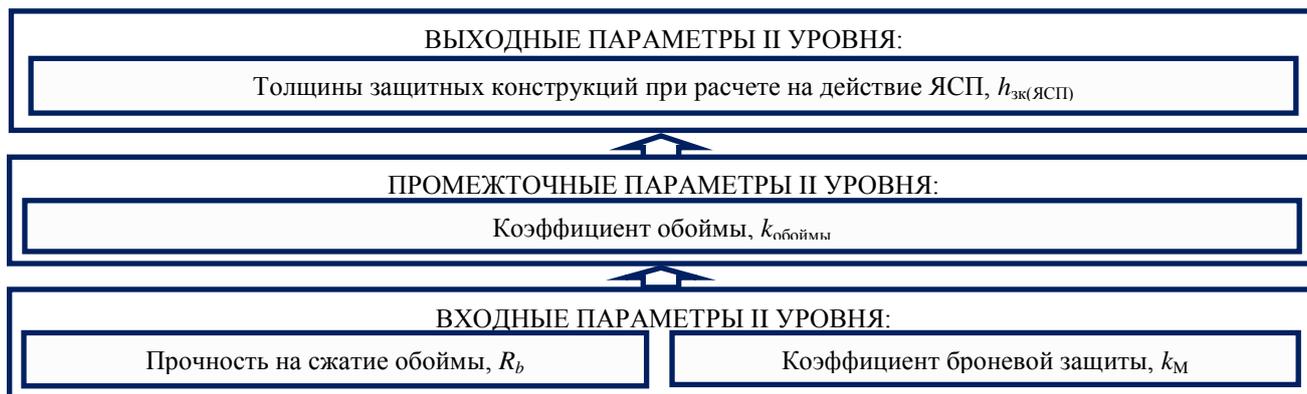


Рис. 5. Детализация взаимосвязей параметров II уровня модели

Входные параметры второго уровня позволяют получить выходные параметры этого уровня: толщины защитных конструкций при расчете на воздействие от ЯСП  $h_{\text{зк(ЯСП)}}$ , толщины защитных конструкций при расчете на воздействие от ОСП  $h_{\text{зк(ОСП)}}$  и коэффициент рикошета  $k_{\text{рик}}$ .

На *третьем уровне* основной входной характеристикой является зависимость физико-химического упрочнения бетона  $R_b$  от величины вводимой поверхностной энергии модифицирующего зольсодержащего раствора  $E_{\text{пов}}$  (рис. 6).



Рис. 6. Детализация взаимосвязей параметров III уровня модели

Прочность на сжатие высокопрочного бетона в монолитной неорганической обойме (при поверхностном модифицировании)  $R_b$  предлагается рассчитывать по следующей зависимости:

$$R_b = (0,35R_{\text{обоймы}} + 0,65R_{\text{ядра}})k_{\text{ф}}n1,2(h/a)^{-0,3}, \quad (7)$$

где  $R_{\text{обоймы}}$  – прочность на сжатие поверхностного сверхпрочного слоя в высокопрочном бетоне;  
 $R_{\text{ядра}}$  – прочность на сжатие бетона в упрочняем этим слоем ядре;  
 $n$  – коэффициент, учитывающий число модифицированных граней обоймы;  
 $h/a$  – отношение высоты образца к его ширине.

На *четвертом уровне* основной входной характеристикой является величина поверхностной энергии, вводимой в высокопрочный бетон при его модифицировании зольсодержащими растворами (рис. 7).



Рис. 7. Детализация взаимосвязей параметров IV уровня модели

Входной параметр четвертого уровня позволяет получить выходной параметр этого уровня – зависимость физико-химического упрочнения бетона  $R_b$ , определяемую по следующей формуле:

$$R_b = 0,01E_{\text{пр}}^3 - 0,6E_{\text{пр}}^2 + 9E_{\text{пр}} + 48,25, \quad (8)$$

где  $E_{\text{пр}}$  – приведенная поверхностная энергия наночастиц золь, вносимая в высокопрочный бетон зольсодержащими растворами при его модифицировании.

**4. Локализация.** Локализация осуществляется путем представления внешней среды в виде генераторов внешних воздействий, включаемых в состав разрабатываемой модели в качестве элементов, представленных на рис. 8.

Воздействия внешней среды на высокопрочный бетон на этом уровне можно рассмотреть в виде физико-химической характеристики наночастиц вводимых золь, имеющей принципиальное значение для поверхностного и объемного модифицирования высокопрочного бетона – поверхностной энергии используемых наночастиц [11].

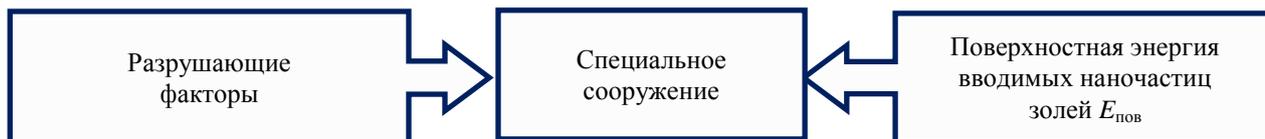


Рис. 8. Локализованная модель системы

**5. Структуризация.** В военном строительстве широко применяют рамные, арочные, купольные, шахтные и сферические СФС. Последние два используют для высоких классов защиты. СФС с пространственной кривизной несущих конструкций и шахтные СФС являются более сложными в производстве строительно-монтажных работ по сравнению с рамными, вследствие чего удорожается их строительство.

Построение структуры концептуальной модели завершается указанием связей между элементами системы (рис. 9).

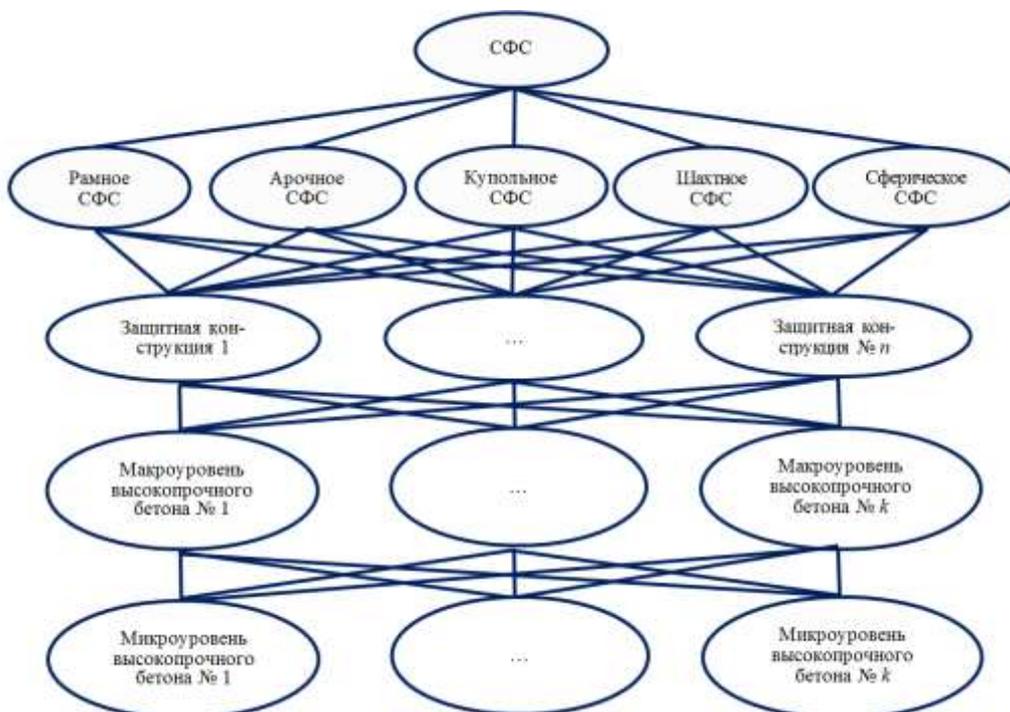


Рис. 9. Структура разработанной концептуальной модели

Имеет место противоречие между простейшими по геометрической форме сооружениями с дешевыми конструкционными материалами и сложными по геометрической форме сооружениями с дорогими конструкционными материалами в достижении конечного результата – получение заданных классов защиты при минимальных затратах.

**6. Выделение процессов.** Все вышеперечисленное отражает статику системы – состав, структуру. Далее модель должна быть дополнена также описанием работы рассматриваемой системы – ее динамики.

На рис. 10 представлена схема преобразования различных видов энергии в процессе разработки СФС из модифицируемого высокопрочного бетона [7].

**7. Отражение состояний.** В данной статье изменение состояния системы во времени не рассматривается, так как не входит в рамки исследований. Соответственно, необходимость рассмотрения седьмого шага отпадает.

Далее была разработана концептуальная модель прогнозирования качества высокопрочного бетона на основе зольсодержащих растворов (рис. 11).

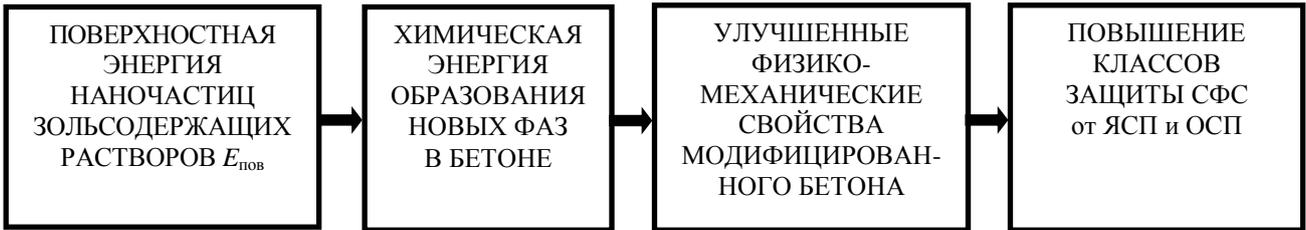


Рис. 10. Схема преобразования различных видов энергии в процессе проектирования сооружения из модифицируемого высокопрочного бетона

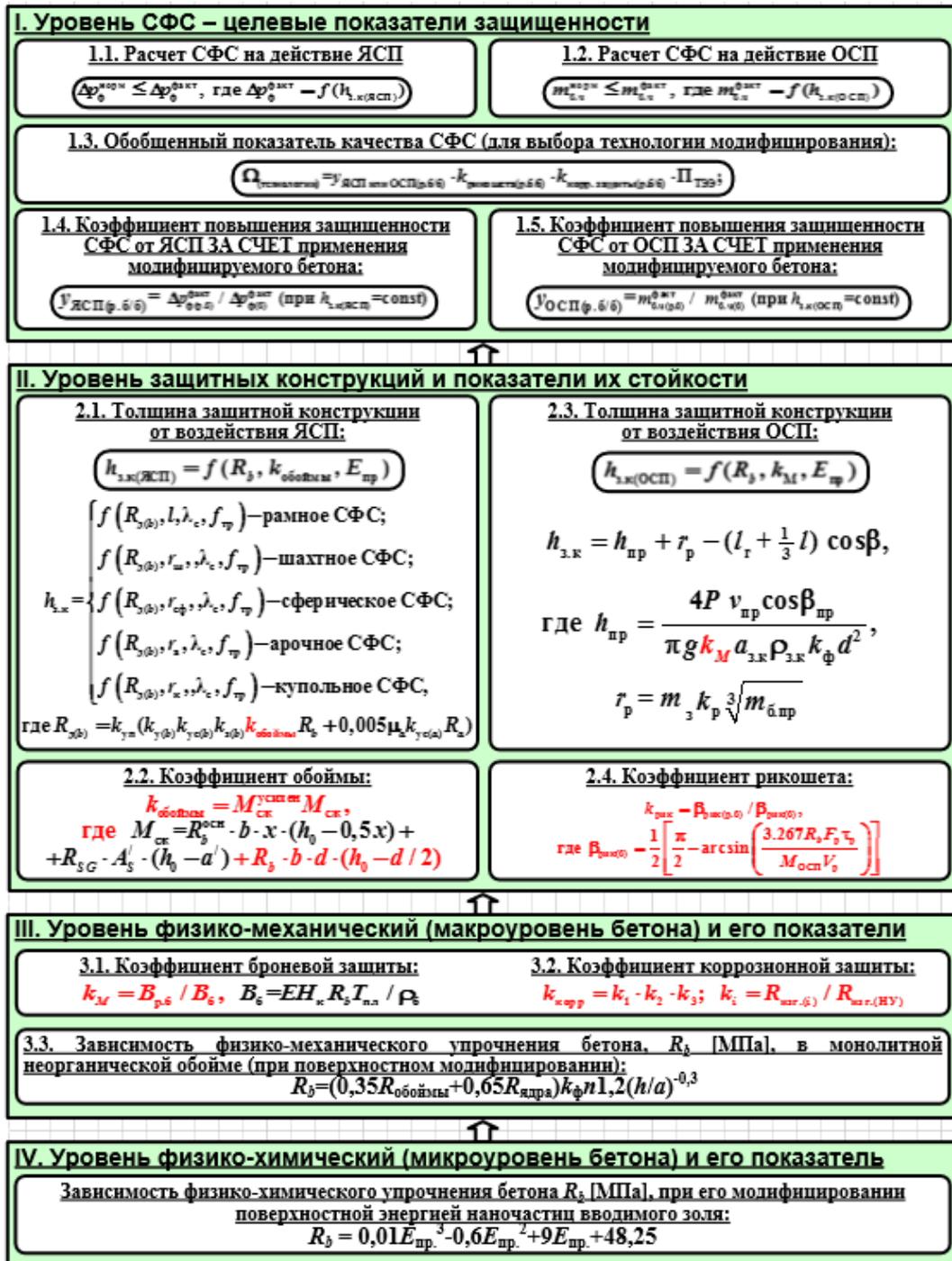


Рис. 11. Концептуальная модель прогнозирования качества высокопрочного бетона на основе зольсодержащих растворов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые разработана концептуальная модель прогнозирования качества высокопрочных бетонов на основе зольсодержащих растворов, в которой выполнено обоснование требуемых физико-механических свойств модифицируемых высокопрочных бетонов. В модели выполнено формализованное описание основных процессов и явлений, происходящих при воздействии на специальное сооружение разрушающих факторов, выделены требуемые физико-механические свойства высокопрочных бетонов, а также учтены новые свойства высокопрочных бетонов, получаемые за счет их модифицирования зольсодержащими растворами.

В разработанной модели впервые введен дополнительный физико-химический (микро-) уровень конструкционного материала и установлена взаимосвязь этого уровня с целевыми классами защиты СФС от различных средств поражения.

### Список используемых источников

1. Повышение качества бетона в монолитной обойме / А. М. Сычева [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 4(80). – С. 3–14.
2. Модифицирование бетона с использованием поверхностной энергии наночастиц / А. М. Сычева [и др.] // Международный журнал разработок и технологий. – 2018. – № 7. – С. 356–360.
3. Сватовская Л. Б., Старчуков Д. С., Шмаков Р. Б. Комплексная оптимизация технологических показателей при поверхностном модифицировании высокопрочных бетонов зольсодержащими составами // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2018. – Вып. 663. – С. 211–217.
4. Повышение долговечности тяжелого бетона за счет золированного антикоррозионного барьера / Д. С. Старчуков [и др.] // Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 7. – С. 58–61.
5. Повышение уровня свойств бетона методом модифицирования поверхности / Л. Б. Сватовская [и др.] // Транспортное строительство. – 2016. – № 7. – С. 30–32.
6. Энергетический аспект оценки бетона, модифицированного кремнеземом / Л. Б. Сватовская [и др.] // Транспортное строительство. – 2016. – № 8. – С. 21–24.
7. Сватовская Л. Б., Старчуков Д. С. О взаимосвязи некоторых параметров искусственных гидросиликатных материалов // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 587–590.
8. Сватовская Л. Б., Юров О. В., Старчуков Д. С. Метод поглощения бетоном комплекса с раствором кремнезоля и образованием гидроизолирующего слоя // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 6. – С. 254–259.
9. Технологии золирования в транспортном строительстве / Л. Б. Сватовская [и др.] // Транспортное строительство. – 2015. – № 2. – С. 6–7.
10. Математическое моделирование эксперимента при получении высокопрочного тяжелого бетона с зольсодержащими добавками / Д. С. Старчуков [и др.] // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2013. – № 5. – С. 58–64.
11. Старчуков Д. С. Разработка комплексной добавки на основе золя гидроксида железа, отличающейся повышенным активирующим и пластифицирующим эффектами действия // Бетон и железобетон. – 2012. – № 3. – С. 11–12.

*Absalyamov D. R., Senchenkov V. I.* Formation of the set of controlled parameters of special technical systems based on the theory of orthogonal transformations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 6–19.

Methodical and mathematical schemes for the formation of the set of informative (controlled) parameters of special technical systems of rocket-space complexes during interval condition control are presented. The content of the schemes consists in processing the trajectories of the output parameters of the system using the theory of orthogonal transformations. The choice of the controlled parameters as an ordered set of coefficients of the decomposition of trajectories into partial sums of the Fourier series based on orthogonal algebraic bases is substantiated. An approach to the approximation of trajectories by partial sums of the Fourier series using the orthogonal Legendre basis is proposed, which is modified for use at any time intervals of control the technical condition. An improved method for determining the power of the set of controlled parameters is developed. A numerical procedure is presented for finding the values of the controlled parameters in the decomposition of trajectories, the analytical form of which is unknown.

The results of processing the trajectory of one of the physical quantities that characterize the functioning of special technical systems, and setting on this basis the set of controlled parameters, are shown.

*Key words: interval control of technical condition, partial sums of the Fourier-Legendre series, orthogonal algebraic basis, mean square convergence.*

*Anisimov Yu. P.* Mathematical modeling of biological wastewater treatment process // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 20–26.

Modern requirements for the quality of discharged wastewater necessitate the development and implementation of completely new methods of wastewater treatment. Due to the complexity of the operation of modern water treatment technologies, it is necessary to introduce operational models and control systems for sewage treatment plants. The article presents a mathematical model of biological wastewater treatment processes. Allowing to predict and manage the operation of biological wastewater treatment facilities.

*Key words: wastewater, biological treatment, aerotank, wastewater treatment.*

*Vakunenkov V. A., Musatov V. I., Nikolaev A. V., Sarkisov S. V.* Performance evaluation of drop irrigation systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 27–31.

The main problem of drip irrigation is drip clogging, which often occurs when irrigating soil with purified waste water. The authors of the article analyzed the work of four different types of drip sprinklers on the frequency of clogging and identifying the dependence between the source of water supplied to irrigation and the probability of clogging. The relevance of the research initiated is due to the increasing role of drip irrigation in agriculture, which is more beneficial than traditional irrigation sources.

*Key words: drip irrigation, clogging, wastewater.*

*Vishnyakov E. P., Ilin A. V., Rybakov V. V.* The issue of increasing the efficiency of the power supply system of military infrastructure objects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 32–39.

In the presence of a significant amount of equipment that has expired its normative term, limited funding for large-scale reconstruction of fixed assets, the creation of an effective system for organizing, implementing and managing repair activities should be one of the main tasks of increasing the efficiency of operating equipment of military infrastructure facilities. The efficiency

of using electrical equipment directly depends on the volume and frequency of maintenance and repair.

To solve these problems, methods for assigning the residual resource of electrical equipment are developed and used, which allow predicting the moment when their limit state occurs with varying accuracy.

Improving operational efficiency by reducing production costs against the background of an increase in the physical volume of repairs should be implemented based on optimizing the layout of production bases and sites, improving the quality of equipment diagnostics, organizing service with the involvement of manufacturers, improving logistics, increasing labor productivity, concluding long-term contracts, introduction of innovative technologies.

*Key words: operation, power supply system, automation of maintenance and repair, maintenance and repair strategies.*

*Voronin A. E., Peshekhonov N. E., Rybakov V. V. Optimization of the operating mode of ring distribution networks of power supply systems to minimize the loss of electrical energy // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 40–45.*

The main directions of power saving in distribution networks of power supply systems of dispersed objects are considered. The optimal modes of network operation for energy saving have been determined. Ways to increase their energy efficiency are presented. The possibility of using genetic algorithms to determine optimal break points is shown.

*Key words: power losses, ring line, the balance of power, break point, genetic algorithms.*

*Voronin A. E., Peshekhonov N. E., Rybakov V. V. Evaluation of the efficiency of reserving power supply systems by diesel power plants in various modes of their operation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 46–53.*

The analysis of various modes of operation of a backup power supply source with a whole multiplicity of redundancy for non-recoverable systems is carried out. Approaches to assessing the reliability of the power supply system with different modes of operation of the reserve, taking into account the peculiarities of the functioning of the diesel generator, are presented. The calculation of the probability of trouble-free operation of various options for reserving the power supply system during the period of need for an increased level of reliability of power supply to responsible consumers.

*Key words: reliability of the power supply system, backup power supply source, standby operation modes, diesel power plant.*

*Gorin V. A., Karagodin V. V., Khomich I. V. Construction and calculation of a mathematical model of a brushless synchronous generator for the study of modes in autonomous power supply systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 54–63.*

The increasing role of autonomous power supply systems in providing reliable power supply to ground-based Space forces complexes, in which brushless synchronous generators with a number of advantages are being increasingly used, is substantiated.

A mathematical model of a brushless synchronous generator in the Simulink environment of the MatLab mathematical package based on the Park-Gorev equations has been developed. The mathematical model includes a model of a synchronous generator and a brushless exciter. The calculation of the main parameters of the resulting model is presented. The resulting mathematical model will expand the arsenal of tools used in conducting mathematical modeling of power supply systems of ground-based complexes in the Matlab environment, and the possibilities of studying autonomous power supply systems, increase the visibility of the results obtained.

*Key words: brushless synchronous generator, mathematical model, Park-Gorev equations, transients.*

Gorin V. A., Karagodin V. V., Khomich I. V. Calculation of optimal speed control of nonlinear objects of the same class using the matlab environment // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 64–70.

The widespread use of digital technology in control systems makes it possible to implement optimal control laws, among which one of the most important is the law of optimal performance. This article discusses the proposed algorithm for finding the optimal control of nonlinear objects of one class in terms of speed, based on the application of the method of sequential support solutions, and its software implementation in the programming language of the mathematical package Matlab.

*Key words: speed-optimal control, numerical methods, initial (zero) approximation, transfer functions, block diagrams, convergence.*

Dvinin V. A., Kretyuk D. A., Rybakov D. V. Strategy for forming the structure of power supply systems of military infrastructure with changing landing places, number and capacity of consumers // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 71–76.

The paper proposes a strategy for the formation of the structure of power supply systems for military infrastructure facilities in the context of changing landing sites, the number and power of consumers during the life cycle of a special facility. According to the proposed strategy, a structural diagram of power supply has been developed, adapting to the characteristics of the objects under consideration. A description of the power supply structural diagram is proposed, the requirements for it and recommendations for the use of specific elements of this structural diagram are determined.

*Key words: individual technical systems, structure of the power supply system, technical and economic indicators, reconstruction, life cycle.*

Zubarev A. V., Prishchepa D. N. Modeling of physical processes occurring in cable lines with SPE insulation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 77–83.

The substantiation of the need to study the choice of methods for diagnosing cable lines is presented, the question of representing the physical processes occurring in cable lines with SPE insulation in the form of mathematical models for further optimization of the operation of cable lines is investigated.

*Key words: power lines, cross-linked polyethylene, control method, integrated monitoring, partial discharges.*

Zubarev A. V., Prishchepa D. N. Mechanisms for selecting the values of parameters for maintenance of elements of the power supply system of military infrastructure facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 84–88.

The article considers the process of choosing the values of the parameters of maintenance of elements of the power supply system of military infrastructure facilities, presents mathematical models for choosing the optimal values of the set of parameters of maintenance of elements of the power supply system.

*Key words: power supply system, technical condition, operating costs, maintenance.*

Karagodin V. V., Revyakov B. A., Rybakov D. V. Research of emergency operation modes power supply systems for military infrastructure using MATLAB // Proceedings of the Military Space

academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 89–96.

Modernization and reconstruction of rocket and space complexes inevitably entail a change in the schematic diagrams of power supply systems and the replacement of their elements, a change in the operating modes of the main electrical equipment and the volume of energy consumption. The solution of these problems is impossible without carrying out numerous and sometimes cumbersome mathematical calculations to determine the parameters of the equipment and various modes of operation of the electrical network. The article discusses the possibility of researching emergency modes of operation of distribution electrical networks by methods of mathematical simulation using the mathematical package MATLAB.

*Key words: power supply system, emergency modes, short-circuit currents, mathematical modeling.*

*Karagodin V. V., Rybakov D. V., Smirnov S. V.* Assessment of the influence of consumers on the level of electromagnetic compatibility at the point of connection to the power supply system of special complexes // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 97–103.

The modernization and reconstruction of power supply systems for special complexes will be carried out on the basis of the introduction of new nonlinear controllable network elements designed to reduce electrical losses (inertial development scenario), as well as through the introduction of digital technologies into power systems (innovative development scenario). In both cases, the problem of electromagnetic compatibility of technical equipment with the supply network arises due to the influence of consumers on the quality of electricity in the places where they are connected to the electrical network. The article discusses the issue of creating a system for managing the quality of electrical energy based on taking into account the influence of electricity consumers on the indicators of the quality of electricity at the connection point.

*Key words: power supply system, electromagnetic compatibility, power quality, power quality indicator, permissible calculated contribution of the consumer to the power quality indicator.*

*Litvinova N. B., Roslyakov E. M., Tupicin Y. E.* Operating staff training using virtual simulators special technical systems // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 104–108.

The article proposes an option for training personnel operating special technical systems of unique complexes using virtual training tools built using flash technologies, using the example of the virtual simulator "Refrigeration unit type XM FUU 80: start-up, shutdown, control of parameters".

*Key words: special technical systems, operation, virtual simulator, refrigeration unit, start and stop modes.*

*Litvinova N. B., Tupicin Y. E., Shishkin E. V.* Methodology for determining optimal periods of maintenance of mechanical equipment of special technical systems using flexible operating strategies // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 109–114.

The article provides a solution to the problem of determining the optimal according to the criterion of the maximum operational readiness coefficient of the maintenance period. As a model of failure of an element of special technical systems, two stages of the failure development process characteristic of mechanical equipment are considered: the random time of occurrence of damage and the time during which the damage develops into failure.

*Key words: maintenance, operational readiness coefficient, damage occurrence, technical condition, random variable distribution, special technical systems.*

*Nekrasov I. N., Pudikov V. V., Shishkin E. V.* Algorithm for controlling air conditioning systems of special facilities based on energy saving // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 115–118.

The article presents the algorithm of the system of automatic control of air conditioning systems in the implementation of energy-saving modes of air treatment.

*Key words:* automatic control systems, ventilation and air conditioning systems, energy-saving air treatment systems.

*Avsyukevich D. A., Mandritsa D. P.* Development of a model of the process of restoration of special structures based on the risk of emergency situations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 119–124.

Recommendations on the formation of a model of the process of functioning of special structures with restoration are presented. It is proposed to evaluate the parameters of permissible damage and the corresponding levels of operational suitability according to the amount of permissible damage and the risk of emergency situations. The parameters of compliance of the levels of operational suitability of special structures of the launch complex with permissible damage in the event of emergency situations are determined.

*Key words:* special structures, operational suitability, risk, emergency situation.

*Aleshichev S. E., Starchukov D. S., Sychova A. M.* Mathematical model for calculating the strength of a concrete sample in a monolithic inorganic shell // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 125–128.

A mathematical model is proposed that takes into account two mechanisms of improving the strength of concrete when its surface is treated with SiO<sub>2</sub> sol. This is a physical and chemical mechanism for increasing the strength of the cement stone of the surface layer of concrete when sol particles are introduced into the concrete and a mechanism for mechanically increasing the strength of the formed monolithic heavy-duty surface layer of the non-reinforced concrete core under load.

*Key words:* concrete, shell, surface energy, sol.

*Buslov A. A., Gusev N. N., Kucherenko A. O.* Method for correcting amplitude errors string converter strain gauge sets of systems of monitoring of technical condition of special structure // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 129–134.

The article is devoted to the actual problem of increasing the noise immunity and reliability of systems for monitoring the technical condition of special structures built using frequency (string) converters with a pulsed excitation method as primary converters. The solutions proposed in the article are aimed at ensuring the maximum signal-to-noise ratio at the output of primary converters. The article analyzes the influence of the pulse amplitude of the vibration excitation force of the string resonator of the primary converter of the test and long-term control systems on the amplitude of its oscillations. Theoretical and experimental studies have shown that in order to maintain the relative error of measuring the frequency of resonator oscillations at a constant level over the entire measurement interval of string converters, it is necessary that the amplitude of the excitation pulse is maintained in direct proportion to the cube of its frequency. The results of experiments showing the influence of the amplitude of the excitation pulses on the amplitude of the string resonator oscillations, and, consequently, the amplitude error of the measurement, are presented. The differences in experimental and theoretical data are analyzed and explained, and hypotheses are put forward to explain these differences. Specific ways to improve the reliability of systems for

monitoring the technical condition of special structures based on string converters with a pulsed excitation method, supported by patents for inventions, are proposed.

*Key words: monitoring the technical condition, special structure, string converter, the amplitude of the force impulse, the amplitude of the string oscillations, stress-strain state parameters, secondary instrument.*

*Velichkin V. Z., Gorodishenina A. Y., Petrochenko M. V., Tyurin E. A. Methodology of in-line organization of works during construction facilities of the technological block of the rocket and space complex // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 135–140.*

The article discusses the improvement of the network modeling methodology for solving problems in the design of the organization of work on the construction of unique structures of the rocket and space complex, in which complex diverse technological processes take place. An example of the formation and calculation of a matrix-network model for the construction of a technological block on a rocket and space complex, including 14 technological processes, is given. The results of calculations showing the relevance of the chosen methodology are presented.

*Key words: Organization of work, flow, in-line construction, rocket and space complex, technological block, network model, critical path, topology, planning.*

Technical solutions using heat-resistant foam concrete for gas duct structures of the universal launch complex of the Angara space rocket complex / V. I. Gera, D. N. Gula, V. G. Kotovich, S. S. Ryabova, A. M. Sychova // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 141–146.

The paper considers the possibility of using heat-resistant foam concrete in the structures of the gas flue of the universal launch complex of the Angara space rocket complex (USK KRK), in order to protect it from gas-dynamic effects during the launch of the launch vehicle. It is proposed to divide the flue into zones according to the temperature of the impact of the gas-dynamic jet. In accordance with this division, designs for different levels of the flue walls with the use of heat-resistant foam concrete are proposed.

*Key words: launch facilities (SS), heat-resistant foam concrete, gas ducts, fire protection.*

*Ginzburg T. V., Zarin S. V., Scherbul K. S. Methodology for monitoring the technical condition of load-bearing rein-forced concrete structures of launch facilities by their natural vibration frequency // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 147–155.*

The article presents a technique for monitoring the technical condition of load-bearing reinforced concrete structures of launch facilities of rocket and space complexes, which allows to increase the reliability of control through the use of vibration diagnostics when monitoring the technical condition of span reinforced concrete structures. The analysis of the normative literature in the field of buildings and structures survey and the mathematical dependence of the natural vibration frequencies of span reinforced concrete structures on the geometric, physico-mechanical and physico-chemical characteristics of structures and their materials allowed us to justify the boundaries of the transition of rein-forced concrete structures from one category of technical condition to another.

*Key words: launch facility, rocket and space complex, technical condition, reinforced concrete structure, natural vibration frequency.*

*Erokhin O. A., Karasev S. Y., Surin D. V. Experimental modeling of the penetrating weapons ricochet from the special structures protective construction // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 156–162.*

The article discusses the issue of practical research of the special structures protection from modern conventional aircraft weapons, analyzes the factors influencing the use of practical (experimental) research methods in the subject area under consideration. Using the principles of geometric and mechanical similarity, the authors substantiate the conduct of a model experiment to study the process of weapons ricochet from the protective construction of special structures and propose an original design of the experimental installation. The conclusions formulated in the work make it possible to reveal the prospects and results of using the proposed experimental model and installation. The topic considered in the article will be of interest to specialists dealing with the issues of ensuring the protection and survivability of special structures in the conditions of using modern conventional penetrating type aviation weapons against them.

*Key words: experimental studies, process modeling, protective construction, ricochet, impact parameters.*

*Karasev S. Y., Machnev S. A., Tyurin E. A.* Scientific and methodological approaches for determining the heat transfer resistance of special-purpose arched bulk structures // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 163–169.

In the article graphic-analytical method of calculation of heat transfer resistance of individual sections of fencing arched available only to registered facilities. The known methods of calculating the heat loss of enclosing structures, which are the calculation of flat walls, i.e. parallel planes enclosing the building on both sides, are analyzed. Calculations of the heat transfer coefficients of individual sections of the arched embankment structure were made. The differences from the known methods of thermal engineering calculation of enclosing structures are presented and the dependence for determining the thermal conductivity of curved multilayer enclosing structures is proposed.

*Key words: arched structure, heat transfer, thermal conductivity.*

*Kovalev F. E., Mohnatkin A. P.* Methods of assessment pre-limit and limit states of bridge superstructure reinforced concrete structures starting structures for setting the height of the compressed zone of concrete // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 170–175.

The article deals with the methodological problems of assessing the reliability of the construction part of the operational launch facilities of rocket and space complexes in the pre-limit and limit states. One of the main parameters, when performing verification calculations of bent reinforced concrete structures by load-bearing capacity, is the height of the compressed concrete zone. Depending on the load, as well as on the defects formed during operation, the height of the compressed concrete zone also changes. Thus, the task is to study the changes in the load-bearing capacity of the height parameter of the compressed concrete zone.

*Key words: starting structure, reinforced concrete structures, technical condition, compressed zone of concrete.*

*Kozlov N. A., Kotovich V. G., Sergeev D. V.* Geodetic control deformation objects by direct vector serif method // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 176–179.

The article discusses the geodetic control deformation objects by direct vector serif method. A variant of the technical implementation of the considered method is proposed. Formulas for calculating angular and linear displacements, as well as increments of coordinates of controlled points, taking into account the intersection angle.

*Key words: geodetic control deformation, direct vector serif, intersection angle.*

*Lebed B. P., Tolmachev S. A., Shevchuk A. M.* The concept of creating advanced mobile-protected systems of weapons // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 180–185.

The paper outlines the concept of creating promising mobile-protected complexes of weapons systems based on equipping them with means of fortification protection and complex masking. The general tactical and technical requirements for the basing of new complexes and their main indicators are stated. The prospects for scientific research to substantiate the increase in the survivability of mobile-protected complexes under the influence of conventional enemy weapons have been determined.

*Key words: mobile-protected complex, basing, conventional weapons, special fortifications, tactical, technical and construction requirements.*

*Lebed B. P., Tolmachev S. A., Shevchuk A. M.* Justification of the requirements for the discovery of military objects taking into account the presence of remote aiming targets // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 186–191.

The article presents a methodological approach to substantiate the requirements for camouflage of external reference points of aiming of high-precision weapons of the enemy when they are used against point and small targets for military purposes. An analytical method is proposed for predicting the probability of hitting an object-target when aiming high-precision weapons ammunition according to the taken out landmarks, taking into account the measures for masking the outboard sighting landmarks. Prospects for further research in the direction of improving the developed analytical method are indicated.

*Key words: military objects, masking, high precision weapons, remote sighting guidelines.*

*Mironov A. N., Soldatenko T. N.* A model for determining the values of the parameters of the optimal strategy for the technical operation of the launch facility according to the criterion of minimum risk // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 192–196.

The model of the strategy of technical operation of the launch facility is considered, the parameters of which are determined on the basis of solving the optimization problem according to the criterion of the minimum risk of an accident of structures of the facility. The states of the model correspond to the categories of technical condition established by regulatory documents. The values of the accident risk levels of each structure are determined based on estimates of their level of damage. It is shown that the proposed approach makes it possible to obtain a significant gain in the value of the risk of the launch facility. A calculated example is given.

*Keywords: Assessment method, earthquake resistance, assessment factors, degree of dangerous, seismic activity, buildings and structures for special purposes.*

*Starchukov D. S., Sycheva A. M.* Modeling of the processes of forming the quality of high-strength concrete based on gold-containing solutions // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb.: MSA named after A. F. Mozhaisky, 2022. – Release 681. – P. 197–204.

An analysis of the experience of operating special structures of rocket and space complexes shows that the high-strength concretes used in them have significant disadvantages that significantly reduce the final durability. The article suggests the use of new high-strength concrete with high quality indicators, achieved by modification with ash-containing solutions. The developed conceptual model of forecasting the quality indicators of high-strength concrete is presented, which allows choosing the technology of their modification. Formulas for calculating new properties of high-strength concrete are proposed, which take them into account in calculations during design.

*Key words: durability, military ranks, special structures, technical operation system.*

**Абсалямов Дамир Расимович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 268-15-33, e-mail: vka@mil.ru

**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: avs.dim@mail.ru

**Алешичев Сергей Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-43, e-mail: vka@mil.ru

**Анисимов Юрий Петрович**, кандидат технических наук, доцент; Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева (199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 8); тел.: 8 (921) 581-60-29, e-mail: anisimov-yuriy@yandex.ru

**Буслов Андрей Александрович**, кандидат военных наук, доцент; НИЦ РЭВ ФИР ВМФ НИИ ОСИС ВУНЦ ВМА имени Н. Г. Кузнецова (196604, Россия, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Красной звезды, 31); тел.: 8 (904) 638-84-70, e-mail: andrey.buslov70rtv@yandex.ru

**Вакуненко Вячеслав Александрович**, кандидат технических наук, доцент; Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); тел.: 8 (921) 657-35-20; e-mail: vakyn@mail.ru

**Величкин Виктор Захарович**, доктор технических наук; Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); тел.: 8 (909) 587-79-18, e-mail: v.velichkin2011@yandex.ru

**Вишняков Евгений Павлович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 940-60-64, 8 (812) 347-95-44, 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 (911) 023-30-88, 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Гера Василий Иосифович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-40, e-mail: vka@mil.ru

**Гинзбург Татьяна Валерьевна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 258-27-24.

**Горин Вадим Александрович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 793-93-70, e-mail: vadim044542010@mail.ru

**Городишенина Анна Юрьевна**, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра

Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); тел.: 8 (921) 795-74-49, e-mail: gorodish\_ayu@spbstu.ru

**Гула Дмитрий Николаевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

**Гусев Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 958-42-90, e-mail: goussev\_nn@mail.ru

**Двинин Валерий Александрович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 772-50-75, e-mail: dvinin40@mail.ru

**Ерохин Олег Анатольевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (967) 176-63-77.

**Зарин Сергей Владимирович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 900-97-98, e-mail: sergeyzarin27091989@gmail.com

**Зубарев Алексей Владимирович**, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 174-67-19, e-mail: vka@mil.ru

**Ильин Антон Викторович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 633-47-95, 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 (911) 227-36-79, e-mail: vladimirkar@rambler.ru

**Карасёв Сергей Юрьевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 954-74-02.

**Ковалев Федор Евгеньевич**, кандидат исторических наук; Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Козлов Николай Аифалович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

**Котович Виталий Гендрихович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Кретюк Денис Александрович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 821-95-42, e-mail: kretuk@mail.ru

**Кучеренко Александр Олегович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 958-19-80, e-mail: kucher\_90@bk.ru

**Лебедь Богдан Петрович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 220-93-70.

**Литвинова Наталья Борисовна**, доктор педагогических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 189-79-24, e-mail: skarlet27@list.ru

**Мандрица Дмитрий Петрович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-46, e-mail: MANDRIZA66@mail.ru

**Мачнев Сергей Александрович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 004-01-02.

**Миронов Андрей Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 275-08-00, e-mail: mironov-anic @yandex.ru

**Мохнаткин Алексей Петрович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Мусатов Вячеслав Игоревич**, Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); тел.: 8 (921) 555-78-21; e-mail: musatov2112@ya.ru

**Некрасов Игорь Николаевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

**Николаев Алексей Владимирович**, доктор технических наук, доцент; ФГБУ «Институт машиностроения имени А. А. Благонравова Российской академии наук» (101000, Россия, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4); тел.: 8 (977) 340-08-67; e-mail: info@imash.ru

**Петроченко Марина Вячеславовна**, кандидат технических наук; Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29); тел.: 8 (921) 316-54-22, e-mail: mpetrochenko@mail.ru

**Пешехонов Николай Егорович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 244-59-48, 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Прищепа Денис Николаевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Пудиков Вячеслав Валентинович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

**Ревяков Борис Александрович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 773-19-48, e-mail: borisluga@mail.ru

**Росляков Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 748-33-69, e-mail: roslem@yandex.ru

**Рыбаков Вячеслав Вячеславович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 245-80-25, 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

**Рыбаков Дмитрий Вячеславович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 914-98-02, e-mail: d\_i\_m\_a\_1\_7@bk.ru

**Рябова Светлана Сергеевна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-45, e-mail: vka@mil.ru

**Саркисов Сергей Владимирович**, доктор технических наук, доцент; Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); тел.: 8 (911) 012-99-69; e-mail: ser-sark@yandex.ru

**Сеньченков Валентин Иванович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 250-60-79, e-mail: vka@mil.ru

**Сергеев Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-43, e-mail: vka@mil.ru

**Смирнов Сергей Викторович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 357-51-43, e-mail: s.v.smirnov23@mail.ru

**Солдатенко Тамара Николаевна**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 954-56-88, e-mail: soldatenko-tn @bk.ru

**Старчуков Дмитрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Сурин Дмитрий Васильевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (963) 248-41-11.

**Сычева Анастасия Максимовна**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 857-22-17, e-mail: vka@mil.ru

**Толмачёв Сергей Анатольевич**, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 224-17-14.

**Тупицин Юрий Евгеньевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (951) 675-39-24, e-mail: Nordman14056@yandex.ru

**Тюрин Евгений Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 099-09-95.

**Тюрин Евгений Анатольевич**, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-45, e-mail: vka@mil.ru

**Хомич Иван Владимирович**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 992-77-22.

**Шевчук Андрей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 911-46-92.

**Шишкин Евгений Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (962) 716-90-58, e-mail: vka@mil.ru

**Щербуль Константин Сергеевич**, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (906) 279-63-33, e-mail: kos-piter@mail.ru

**Абсалямов Дамир Расимович**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-43, e-mail: vka.spb.ru

**Абу-Хасан Махмуд Самиевич**, доктор технических наук, профессор; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), тел.: 8 (812) 457-81-09, e-mail: pgs@pgups.ru

**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.spb.ru

**Горбулин Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 299-27-76, e-mail: vka.spb.ru

**Гуков Дмитрий Васильевич**, доктор технических наук, профессор; Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва (191123, Россия, Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22); тел.: 8 (812) 579-55-71, e-mail: vka.spb.ru

**Гусев Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-45, e-mail: vka.spb.ru

**Доронин Александр Павлович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 943-66-40, e-mail: vka.spb.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.spb.ru

**Козин Петр Александрович**, доктор технических наук, профессор; ООО «РМС-Оценка» (191123, Россия, Санкт-Петербург, пр. Чернышевского, 17); тел.: 8 (812) 324-54-23, e-mail: pkozin@rms-ocenka.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) 347-95-13, e-mail: vka.spb.ru

**Опарин Сергей Геннадьевич**, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), e-mail: oparinsg@mail.ru

**Садин Дмитрий Викторович**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-11, e-mail: vka.spb.ru

**Сербин Юрий Владимирович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник; научно-технический центр «Энергоснабжение» (191124, Россия, Санкт-Петербург, Синопская наб., 54); тел.: 8 (812) 336-87-51, e-mail: Y.Serbin@spb.promgaz.gazprom.ru, mailto:vladimirkar@rambler.ru

**Сурин Дмитрий Васильевич**, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-41, e-mail: vka.spb.ru

**Сычева Анастасия Максимовна**, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-45, e-mail: vka.spb.ru

**Толмачев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник; научно-технический центр «Энергоснабжение» (191124, Россия, Санкт-Петербург, Синопская наб., 54); тел.: 8 (911) 701-75-08, e-mail: V.Tolmachev@spb.promgaz.gazprom.ru, mailto:vladimirkar@rambler.ru