

СОДЕРЖАНИЕ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА**

Северцев Н. А., Дарьина А. Н.
ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ПРИ РЕСУРСНОЙ ОТРАБОТКЕ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИЗДЕЛИЙ 5

Земцова Н. И.
НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В ПРОБЛЕМЕ МНОГИХ ТЕЛ 15

Козлов С. В.
ПРОЦЕССНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СОЗДАНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ 22

Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н.
О МЕТОДЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАТОРА ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ
ОБОСНОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 31

Кубасов И. А.
УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ 42

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

Клячкин В. Н., Жуков Д. А.
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АГРЕГИРОВАННЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ 50

Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Абдирашев О. К., Ергалиев Д. С., Тулегулов А. Д.
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРЯЮЩИХ ФАКТОРОВ 58

Березнев В. А.
СИСТЕМА БЕЗАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ 73

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ**

Муравьев К. А., Алябьев И. О., Синютина Д. С., Шушуев А. И.
АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ 79

Калашников В. С., Лысенко А. В., Таньков Г. В., Трусов В. А., Реута Н. С. ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ	90
Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. ДРЕВОВИДНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ.....	98
Ильин А. С., Плаксунов Р. Ф., Воронов А. П., Кострикина И. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ УПК-30ПТ	109
Маслобоев А. В. НАВСТРЕЧУ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР	115
Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ.....	131
Елинов Д. А., Бирюкова О. В., Чернецов М. В., Лапшин Э. В., Тюрина Л. А. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ.....	139
Рыбак Е. В. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ СЕМЕЙСТВА AIRBUS A-320 ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ПОСТОРОННИМИ ПРЕДМЕТАМИ.....	149
Рыбак Е. В. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ AIRBUS A-320 FAMILY ПОСЛЕ СЛОЖНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ	155

RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 4 (32) 2020

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Severtsev N. A., Daryina A. N. APPLICATION OF SIMILARITY CRITERIA FOR RESOURCE DEVELOPMENT OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS AND PRODUCTS	5
Zemtsova N. I. NEW SOLUTIONS IN THE MANY – BODY PROBLEM.....	15
Kozlov S. V. PROCESS ASPECTS OF IMPROVING THE QUALITY OF CREATING INTELLIGENT INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEMS.....	22
Ostreykovsky V. A., Lysenkova S. A., Shevchenko E. N. ON THE APPROACH TO APPLYING THE INTERNAL TIME OPERATOR IN THE PROBLEMS OF JUSTIFICATION OF THE LONGEVITY OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS	31
Kubasov I. A. MANAGING THE SAFETY OF POTENTIALLY HAZARDOUS OBJECTS.....	42

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Klyachkin V. N., Zhukov D. A. AUTOMATED DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE OBJECT USING THE AGGREGATED CLASSIFIERS	50
Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Abdirashev O. K., Ergaliev D. S., Tulegulov A. D. METHODOLOGY FOR ASSESSING THE RESIDUAL LIFE OF THE ELECTRONIC UNIT WITH THE USE OF ACCELERATING FACTORS.....	58
Bereznev V. A. SYSTEM FOR TROUBLE-FREE CONTROL OF A ROBOTS GROUP	73

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

Murav'ev K. A., Alyab'ev I. O., Sinyutina D. S., Shushuev A. I. ALGORITHMS MIC DESIGN OF WIRELESS SENSOR NETWORKS	79
Kalashnikov V. S., Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Trusov V. A., Reuta N. S. FORMATION OF THE CONTROL SIGNAL OF THE ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF VIBRATION TESTS	90

Mikheev M. Yu., Prokofev O. V., Semochkina I. Yu. TREEMAPS TO IMPROVE QUALITY OF SUPPORT OF DECISIONS	98
Ilin A. S., Plaksunov R. F., Voronov A. P., Kostrikina I. A. INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OPERATING MODES ON THE MEASUREMENT ACCURACY OF THE INSTALLATION FOR CALIBRATION OF KILOVOLTMETERS UPK-30 PT	109
Masloboev A. V. TOWARDS A THEORY OF REGIONAL CRITICAL INFRASTRUCTURE SECURITY AND RESILIENCE	115
Mel'nichuk A. I., Goryachev N. V., Yurkov N. K. WAYS AND MEANS OF COUNTERING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE	131
Elinov D. A., Biryukova O. V., Chernetsov M. V., Lapshin E. V., Tyurina L. A. ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES OF USING SOLAR POWER PLANTS TO GENERATE ELECTRICITY IN THE PENZA REGION.....	139
Rybak E. V. MAINTENANCE FEATURES AIRCRAFT OF THE AIRBUS A320 FAMILY IF DAMAGED BY FOREIGN OBJECTS.....	149
Rybak E. V. MAINTENANCE OF THE AIRBUS A-320 FAMILY AFTER DIFFICULT OPERATING CONDITIONS	155

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 681.2.084-192

DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-1

Н. А. Северцев, А. Н. Дарьина

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ПРИ РЕСУРСНОЙ ОТРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИЗДЕЛИЙ

N. A. Severtsev, A. N. Daryina

APPLICATION OF SIMILARITY CRITERIA FOR RESOURCE DEVELOPMENT OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS AND PRODUCTS

Аннотация. В практике отработки (испытаний) создаваемой системы, как правило, воспроизводится более узкий спектр нагрузки, поэтому при разных других условиях разброс результатов испытаний будет существенно меньше разброса этого же параметра в условиях реальной эксплуатации. Кроме того, экспериментальная оценка исследуемого параметра, полученная по результатам испытаний, является схожей по физической природе, поскольку в процессе испытаний воспроизводится не весь спектр нагрузок, а те нагрузки, которые задаются и имеют ту или иную степень приближения. Это объясняется тем, что точное моделирование всего спектра нагрузок практически неосуществимо, а экономически нецелесообразно. Возникает проблема сравнения разных методов испытаний и пересчета их результатов. В статье приводятся варианты применения критериев подобия к различным процессам при отработке (испытаниях) сложных технических систем.

Ключевые слова: сложная техническая система, критерии подобия, вероятность, отказоустойчивость, надежность.

Abstract. In practice, testing (creating) the created system, as a rule, reproduces a narrower spectrum of the load, therefore, under various other conditions, the spread of the test results will be significantly less than the spread of the same parameter in real use. In addition, the experimental assessment of the parameter under study, obtained from the test results, is similar in physical nature, since in the process of testing not all spectrum of loads is reproduced, but those loads that are set and have one or another degree of approximation. This is because accurate modeling of the entire spectrum of loads is practically impracticable, and economically impractical. There is a problem of comparing different test methods and recounting their results. The article provides options for applying the similarity criteria to various processes during the development (testing) of complex technical systems.

Keywords: complex technical system, similarity criteria, probability, fault tolerance, reliability.

Введение

При отработке сложных технических систем (СТС) на ресурс, т.е. на долговечность, используются модели, описывающие закономерности процессов отказоустойчивости СТС, которая характеризуется постепенными изменениями параметров вследствие изнашивания, регулирования и старения, а также вследствие внешнего агрессивного воздействия на СТС специального назначения, включая воздействия информационными технологиями. Использование методов теории подобия для

физического моделирования при испытаниях на ресурс и защиту заключается в установлении типовых признаков отказов, исследования закономерностей их возникновения. Стохастический подход к моделированию процессов отказов учитывает многообразие случайных факторов, действующих на СТС в эксплуатации [1]. Для построения критериев подобия параметрических отказов необходимо учитывать динамику процессов изменения в зависимости от времени характеристик работоспособности и действующих на СТС факторов. Для детерминированных критериев подобия наиболее простым для их построения является случай линейных детерминированных зависимостей, описывающих процесс изменения определяющего параметра [2].

При выбранных нагрузках $C_{b_0}, C_U, C_{y_0}, C_t$ из условия подобия определяется необходимый коэффициент форсирования нагрузки C_x и из него нагрузки x . В случаях масштабного фактора форсирования нагрузки необходимо устанавливать предельную нагрузку x^M , при которой сохраняется подобие физических процессов при функционировании СТС в нормальном и форсированном режиме. Метод построения и применения критериев подобия на основе преобразованных исходных зависимостей, описывающих исследуемые процессы параметрических отказов, идентичен и для других случаев детерминированных процессов отказов.

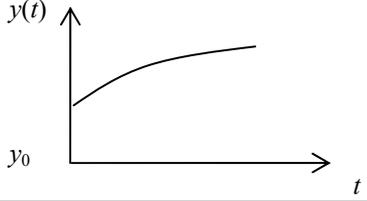
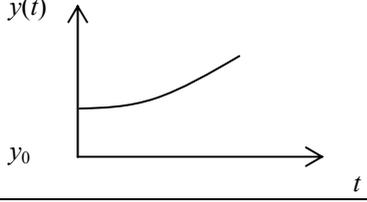
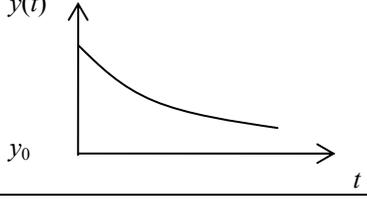
Для нелинейных процессов критерии подобия определяются на основании первой и второй теорем подобия с использованием правила установления подобия процессов, содержащих неоднородные функции [2].

Применение критериев подобия для нелинейных процессов

Критерии подобия для наиболее распространенных нелинейных детерминированных процессов постепенных отказов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии подобия нелинейных процессов изнашивания СТС

График изменения	Уравнения процесса изнашивания	Критерии подобия	*Примеры процесса
	$y(t) = y_0 + \int_0^t a t e^{-bt} dt$	$\pi_1 = bt$ $\pi_2 = \frac{at^2}{y_0}$	Коррозия, разгерметизация
	$y(t) = y_0 + A(e^{bt} - 1)$	$\pi_1 = \frac{A}{y_0}$ $\pi_2 = bt$	Изнашивание контактных пар
	$y(t) = y_0 + A(1 - e^{-bt})$	$\pi_1 = \frac{A}{y_0}$ $\pi_2 = bt$	Изнашивание в период приработки
	$y(t) = y_0 e^{-bt}$	$\pi_1 = bt$	Выход из работоспособности

Примечание. Примеры процесса показаны условно.

Тогда критерий подобия для рассматриваемого класса линейных исходных зависимостей примет вид

$$\pi_1(t) = \left(1 + \frac{Ux}{b_0}\right) \frac{b_0}{y_0} t.$$

В соответствии с третьей теоремой подобия условия однозначности линейного процесса изнашивания (выход из строя) имеют вид при

$$\begin{cases} t = 0, \pi_1(0) = 0, \\ t = T, \pi_1(T) = \pi_{\max} = \frac{y_{\max}}{y_0} - 1. \end{cases} \quad (2)$$

Критерии подобия параметрических отказов могут использоваться для планирования отработочных испытаний на ресурс по следующей процедуре.

Пусть требуется подтвердить необходимый ресурс T СТС за время испытаний T_ϕ . Параметры, характеризующие процесс отказа, равны y_0, y_{\max}, b_0 . Индикатор подобия испытаний (отработки) СТС в реальных условиях и в форсированном режиме имеет вид

$$\left(1 + \frac{Ux}{b_0}\right) \frac{b_0}{y_0} T = \left(1 - \frac{Ux_\phi}{b_0}\right) \frac{b_0}{y_0} T_\phi. \quad (3)$$

Обозначим $C_T = \frac{T}{T_\phi}$ – коэффициент форсирования испытаний по времени; C_X – коэффициент форсирования испытаний по нагрузке. С учетом (2) и (3) получим

$$C_X = \frac{\pi_{\max} - \frac{b_0 T}{y_0}}{C_T \left(\pi_{\max} - \frac{b_0 T}{C_T y_0}\right)} \text{ и } X_\phi = \frac{X}{C_X}.$$

В случае, когда испытаниями на ресурс назначается конструктивно-подобная модель и коэффициенты подобия равны, тогда

$$\frac{b_0}{b_0^M} = C_{b_0}; \quad \frac{U}{U^M} = C_U; \quad \frac{y_0}{y_0^M} = C_{y_0}; \quad \frac{X}{X^M} = C_X; \quad \frac{T}{T^M} = C_T.$$

Индикатор подобия имеет вид

$$\frac{\pi_{\max} - \frac{b_0 T}{y_0}}{\pi_{\max} - \frac{C_{y_0}}{C_b} \frac{b_0 T}{C_T y_0}} \times \frac{C_{y_0} C_U}{C_T C_X} = 1.$$

Задача построения и применения критериев подобия параметрических отказов разбивается на следующие этапы:

- выбор наиболее информативных параметров, характеризующих процесс отказов;
- формирование требований к объектам и условиям испытаний при планировании критериальных комплексов для оценки завершенности отработки.

Применение критериев подобия для линейных процессов

Рассмотрим задачу критериев подобия линейных полуслучайных процессов отказов СТС. Известно [3, 4], что в ряде случаев процессы отказов могут быть представлены в виде линейной полуслучайной функции изменения определяющего параметра

$$y = y_0 + Bt, \tag{4}$$

где B – скорость изменения определяющего параметра, являющаяся случайной величиной; y_0 – начальное значение определяющего параметра. Для практических целей важен случай, когда справедлива зависимость

$$B = b_0 + Ux,$$

где b_0 – начальная скорость изменения определяющего параметра, а U – чувствительность скорости B к нагрузкам; x – величина нагрузки. Считаем, что для испытываемой СТС b_0 и U – неслучайные величины, являющиеся параметрами СТС, а нагрузка x – случайная величина, подчиненная нормальному закону распределения с параметрами m_x и σ_x . Скорость B также будет иметь нормальное распределение. Параметры распределения величины B будут иметь вид $m_b = b_0 + Um_x$, $\sigma_b = U\sigma_x$. В момент отказов, когда определяющий параметр y достигает предельного значения y_{\max} , выражение (4) примет вид $y_{\max} = y_0 + Bt$. Плотность распределения наработки до отказа $T = \frac{y_{\max} - y_0}{B}$ является функцией случайной величины B , которая определяется по известной плотности $f(B)$

$$f(t) = [\psi(t)\psi'(t)], \tag{5}$$

где $\psi(t) = \frac{y_{\max} - y_0}{t} = \frac{\Delta y}{t} = B$; $\psi'(t) = \frac{\Delta y}{t^2}$.

В результате подстановки в (5) выражений для $\psi(t)$ и $\psi'(t)$ получим плотность распределения $f(t)$, называемой α -распределением

$$f(t) = \frac{m_i C}{\delta \sqrt{2\pi}} \frac{1}{t^2} e^{-\frac{(m_i - t)^2}{2\delta^2 t^2}},$$

где $m_i = \frac{\Delta y}{m_b}$ – средняя наработка до отказа; $\delta = \frac{\sigma_b}{m_b}$ – коэффициент вариации; C – нормирующий множитель.

При построении критерия подобия детерминированно-определенных параметров СТС испытаний с показателями отказоустойчивости, надежности, живучести и безопасности, требования задаются, например, в виде вероятности безотказной работы. Введем безразмерную случайную величину $T_1 = \frac{T}{m_i}$, плотность распределения которой будет иметь вид

$$f(\tau) = \frac{C}{\delta \sqrt{2\pi}} \frac{1}{\tau^2} e^{-\frac{(1-\tau)^2}{2\delta^2 \tau^2}}.$$

Функции плотности распределения $f(t)$ и $f(\tau)$ связаны соотношением $f(\tau) = m_i f(t)$. Вероятность отказа СТС определяется по формуле

$$q(t) = F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau = F(\tau).$$

Обозначим $z = \frac{1-\tau}{\delta\tau}$. Тогда вероятность безотказной работы СТС

$$P(t) = 1 - F(\tau) = 1 - \int_0^{\tau_1} f(\tau) d\tau = F_0(z), \tag{6}$$

где $F_0(z)$ – интегральная функция Лапласа. Исходя из принципа установления стохастического подобия на основе равно отказоустойчивости сравниваемых систем (изделий, объектов, в данном случае по параметрическим отказам), с учетом (6) критерий подобия будет иметь вид

$$\pi = \frac{1 - \tau}{\delta \tau} = \frac{\Delta y - T(b_0 + Um_x)}{U \sigma_x T} = \text{idem.} \quad (7)$$

В критериальном комплексе (7) взаимосвязаны физические параметры СТС и вероятностные характеристики нагрузки.

Если требования к отказоустойчивости СТС задаются в виде вероятности безотказной работы, (характеризующие живучесть, надежность, безопасность, отказоустойчивость) $P_{\text{тр}}$, то условие подобия будет иметь вид $P(t) = P_{\text{тр}}$. Зависимость, устанавливающая взаимосвязь перечисленных показателей, параметров испытываемой СТС и действующей нагрузки представляется в виде

$$\frac{\Delta y - T(b_0 + Um_x)}{U \sigma_x T} = Z_{\text{тр}}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{тр}}$ – квантиль нормального распределения уровня $P_{\text{тр}}$. Используя выражение (8), представляется возможность формировать требования к испытаниям при планировании отработки и проводить оценку завершенности испытаний исследуемой СТС (изделия и др.) [7].

Применение критериев подобия к нелинейным случайным величинам

Рассмотрим критерии подобия нелинейных случайных величин. Если случайная нагрузка не может считаться постоянной в течение промежутка времени функционирования СТС, тогда линейная полуслучайная модель процессов отказов становится неадекватной. В этом случае нагрузка должна рассматриваться как случайная функция времени. Процесс изнашивания при рассмотрении нагрузки как случайной функции времени может быть представлен в виде

$$y(t) = y_0 + \int_0^t (b_0 + U x(t)) dt .$$

Процесс параметрических отказов можно описать с помощью схемы изнашивания с накоплением повреждений. Согласно этой схеме, в случайные моменты времени возникают единичные повреждения равной величины. При накоплении r повреждений наступает отказ СТС. Повреждение состоит в том, что в результате изнашивания скачкообразно увеличивается определяющий параметр на некоторую постоянную величину Δy [8]. Описанная схема изнашивания справедлива при соблюдении следующих условий:

– вероятность γ возникновения скачка изнашивания за время от t до $t + \Delta t$ приближенно пропорциональна длительности, т.е. $\gamma = \lambda \Delta t + \vartheta(\Delta t)$, где $\vartheta(\Delta t)$ – бесконечно малая высшего порядка относительно Δt – это условие определяет свойство постоянства средней скорости изнашивания;

– вероятность более одного скачка в промежутке $(t, t + \Delta t)$ мала при малых Δt . Это условие определяет свойство ординарности потока накопления повреждений. Вероятность каждого следующего скачка не зависит от числа ранее произошедших скачков, что справедливо для зоны установившегося (нормального) изнашивания. В зоне нормального изнашивания параметр приобретает стабильное свойство.

При выполнении перечисленных условий время безотказной работы СТС имеет гамма-распределение [9]. Для целых r функция распределения времени τ имеет вид

$$F(t) = P\{\tau \leq T, k = r\} = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} ,$$

где $\frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} = P_k(T)$ – есть вероятность того, что к моменту T произошло k скачков (повреждений). Параметры λ и r гамма-распределения времени безотказной работы СТС, подверженного из-

носу определяются так: параметр $y(t)$ измеряется через фиксированные постоянные промежутки времени Δt . Математическое ожидание и дисперсия величины изменения определяющего параметра за интервал времени Δt для гамма-распределения соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} M\{\Delta y k(\Delta)\} &= \Delta y \lambda t, \\ D\{y k(\Delta)\} &= \Delta y^2 \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где Δy – величина износа СТС, приходящаяся на одно повреждение (скачок); $k(\Delta)$ – случайная величина, равная числу скачок за интервал времени Δt .

В то же время для процесса (9) можно записать

$$\left. \begin{aligned} M[y(t + \Delta t) - y(t)] &= M\left[\int_0^{\Delta t} (b_0 + U x(t)) dt\right] = [b_0 + U m_x] \Delta t, \\ D[y(t + \Delta t) - y(t)] &= D\left[\int_0^{\Delta t} (b_0 + U x(t)) dt\right] = U^2 \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta t} K_x(t, t') dt dt', \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $m_x = M\{x(t)\}$ – математическое ожидание случайного процесса воздействия нагрузок; $K_x(t, t')$ – корреляционная функция случайного процесса воздействия нагрузок. Для гамма-закона распределения $F(T)$ должно удовлетворяться требование $m_x = \text{const}$.

Подставив (9) в (10), получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta y &= \frac{U^2 \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta t} K_x(t, t') dt dt'}{[b_0 + U m_x] \Delta t}; \\ \lambda &= \frac{b_0 + U m_x}{\Delta y}; \quad r = \frac{y_{\text{кр}} - y_0}{\Delta y}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Вероятность безотказной работы СТС, подверженной изнашиванию, определяется в рассматриваемом выше случае как

$$P(T) = 1 - F(t) = P\{\tau > T, k = r\} = \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}.$$

Критерий стохастического подобия процесса изнашивания с накоплением повреждений с учетом (9) будет иметь вид

$$\pi = \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} = \text{idem}. \quad (12)$$

Величины λ и r , входящие в критерий подобия (12), определяются из выражения (11). Выбор параметров объекта – испытаний $(y_{\text{max}}, y_0, b_0, U)$, определяющих процесс изнашивания при заданных характеристиках случайной нагрузки, а также параметров λ и r , осуществляется таким образом, чтобы обеспечить при планировании испытаний требования $\pi = \text{idem}$.

Величина π устанавливается с учетом требований к отказоустойчивости $P_{\text{тр}}$. Из условия стохастического подобия (12) могут быть также определены величины $(y_{\text{max}}, y_0, b_0, U)$, используемые для контроля хода и оценки завершенности обработки системы (изделия, объекта). Необходимо отметить, что Δy должна быть достаточно малой для обеспечения точной аппроксимации процесса $y(t)$ ступенчатой функцией. Для снижения влияния ошибки измерения на аппроксимацию кривой изнашивания интервал Δt между измерениями следует выбирать так, чтобы ошибка измерения была мала по сравнению с приращением Δy на этот интервал времени. При описании процесса с неза-

висимыми приращениями скорости изнашивания время функционирования СТС разбивается на фиксированные постоянные интервалы времени Δt . Предполагается, что скорости процесса на каждом интервале являются случайными независимыми величинами, измененными на протяжении интервала Δt .

Закон распределения скорости на каждом интервале времени известен и остается неизменным для всех временных интервалов.

Процесс изнашивания исследуемой системы (объекта, изделия) для данной схемы представим в виде

$$y(t_i) = y(i \Delta t) = y_0 + \Delta t \sum_{j=1}^i (b_0 - U x_j), \quad (13)$$

где $i = 1, 2, \dots$ – номер точки, в которой рассматривается процесс.

В выражении (13) через x_j обозначена случайная величина нагрузки на j -м интервале времени. Плотность распределения $f(x_j)$ нагрузки x_j постоянна независимо от номера интервала. Критическое значение определяющего параметра $y_{кр}$, соответствующее отказовому состоянию СТС, достигается в некотором случайном промежутке времени $t - s \Delta t$.

Выражение (13) для критического случая имеет вид [10]

$$y_{\max}(T) = y_0 + \Delta t \sum_{j=1}^{s-1} (b_0 + U x_j) + (T - s \Delta t)(b_0 + U x_s). \quad (14)$$

Вероятность безотказной работы СТС по параметру на отрезке времени $(0, i - \Delta t)$ определяется так. Отказ в результате достижения параметром y значения y_{\max} на первом временном интервале $\Delta = t_1 - t_0 = t_1$. Функционирование СТС наступит тогда, когда будет $y_{\max} < y_0 + \Delta t(b_0 + U x_1)$ или

$x_1 \geq \frac{y_{\max} - y_0 - b_0}{U} = s_1$. Вероятность отказа СТС соответствует вероятности события, когда $x_1 \geq s_1$, и определяется формулой

$$q(0, t_1) = P(x_1 \geq s_1) = \int_{s_1}^{\infty} f(x_1) dx_1 = \int_{s_1}^{\infty} f(x) dx.$$

Соответственно, вероятность безотказной работы СТС

$$P(0, t_1) = 1 - q(0, t_1) = 1 - \int_{s_1}^{\infty} f(x) dx.$$

Отказ на втором временном участке $\Delta t = t_2 - t_1$ произойдет при наступлении следующих двух условий:

- 1) $y_0 + \Delta t(b_0 - U x_1) < y_{\max}$ – на интервале времени $(0, t_1)$ отказа не произошло;
- 2) $y_0 + \Delta t(2b_0 - U(x_1 + x_2)) \geq y_{\max}$ – на интервале времени (t_1, t_2) произошел отказ. Условия 1), 2) можно выразить через случайную величину нагрузки в следующем виде:

$$x_1 \leq s_1; x_1 + x_2 \geq \frac{y_{\max} - y_0 - 2b_0}{U} = s_2.$$

Вероятность отказа на участке (t_1, t_2) представляет собой вероятность одновременного выполнения условий 1) и 2) и определяется формулой

$$q(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{s_1} f(x_1) dx_1 \int_{s_2 - x_1}^{\infty} f(x_2) dx_2 = \int_{-\infty}^{s_1} f(x) dx \int_{s_2 - x_1}^{\infty} f(x) dx.$$

Для произвольного i -го участка времени (t_{i-1}, t_i) условием отказа является совместное выполнение таких событий, которые можно представить с помощью величин нагрузок на каждом интервале времени, т.е.

$$x_1 < s_1 - \text{отсутствует отказ на интервале } (0, t_1);$$

$$x_2 < s_2 - x_1 - \text{отсутствует отказ на интервале } (t_1, t_2);$$

$$x_3 < s_3 - (x_1 + x_2) - \text{отсутствует отказ на интервале } (t_2, t_3);$$

$$x_i \geq s_i - \sum_{j=1}^{i-1} x_j - \text{произошел отказ на интервале } (t_{i-1}, t_i),$$

$$\text{где } s_i = \frac{y_{\text{кр}} - y_0 - i b_0}{U \Delta t}.$$

Вероятность отказа на i -м интервале времени (t_{i-1}, t_i) определяется выражением

$$q(t_{i-1}, t_i) = \int_{-\infty}^{s_1} f(x) dx \int_{-\infty}^{s_2 - x_1} f(x) dx \int_{-\infty}^{s_3 - (x_1 + x_2)} f(x) dx \dots \int_{s_1 - \sum_{j=1}^{i-1} x_j}^{s_i} f(x) dx. \quad (15)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы на интервале времени $(0, t_i)$ определяется в виде

$$P(0, t_i) = 1 - \sum_{j=1}^i q(t_{j-1}, t_j).$$

Число i на интервале Δt , на которые разбивается процесс при вычислении вероятности $P(0, t_i)$, оценивается при выбранном Δt и заданном времени $t_{\text{пр}}$ функционирования СТС как $i = t_{\text{пр}} / \Delta t$. Критерий стохастического подобия процессов изнашивания исследуемых систем при их аппроксимации ступенчатым процессом с независимыми приращениями скорости износа представляется в виде

$$\pi = \sum_{j=1}^i q(t_{j-1}, t_j) = \text{idem.}$$

С помощью выражений (14), (15) критерий подобия устанавливает взаимосвязь физических параметров и вероятностных характеристик процесса изнашивания исследуемой системы (объекта, изделия). Поскольку многомерный интеграл (15) достаточно сложно аналитически вычисляется, поэтому явную зависимость между параметрами изнашивания и требованиями по отказоустойчивости исследуемых образцов (систем, объектов, изделий устройств) целесообразно определять с помощью ПЭВМ.

Изложенная теория может применяться к любым сложным техническим системам, в том числе и робототехническим [11, 12].

Библиографический список

1. Барлоу, Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан ; пер. с англ. под ред. И. А. Ушакова. – Москва : Наука, 1984.
2. Северцев, Н. А. Статистическая теория подобия в задачах безопасности и надежности динамических систем / Н. А. Северцев. – Москва : Радиотехника, 2016.
3. Северцев, Н. А. Системный анализ и моделирование безопасности / Н. А. Северцев, В. К. Дедков. – Москва : Высш. шк., 2007. – 320 с.
4. Северцев, Н. А. Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009. – 451 с.
5. Коваленко, И. Н. Вероятностный расчет и оптимизация / И. Н. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1989.

6. Бочаров, П. П. Теория вероятностей и математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – Москва : Физматлит, 2005. – 296 с.
7. Михайлов, В. С. Оценки показателей надежности для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану / В. С. Михайлов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4. – С. 29–39.
8. Барзилович, Е. Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов. – Москва : Сов. радио, 1971. – 272 с.
9. Гнеденко, Б. В. Математические методы теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965. – 524 с.
10. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – Санкт-Петербург, 2007. – 276 с.
11. Северцев, Н. А. Безопасность сложных технических и робототехнических систем / Н. А. Северцев, Ю. А. Савин // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию со дня рождения академика Н. А. Пилюгина (4–6 июня 2019, Елец, Россия). – Елец, 2019. – С. 392–396.
12. Бецков, А. В. Аэромобильные комплексы для обеспечения безопасности / А. В. Бецков, И. В. Прокопьев, В. Л. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 66–68.

References

1. Barlou R., Proshan F. *Statisticheskaya teoriya nadezhnosti i ispytaniya na bezotkaznost'* [Statistical theory of reliability and reliability tests]; transl. from Engl. Moscow: Nauka, 1984. [In Russian]
2. Severtsev N. A. *Statisticheskaya teoriya podobiya v zadachakh bezopasnosti i nadezhnosti dinamicheskikh sistem* [Statistical similarity theory in problems of safety and reliability of dynamical systems]. Moscow: Radiotekhnika, 2016. [In Russian]
3. Severtsev N. A., Dedkov V. K. *Sistemnyy analiz i modelirovanie bezopasnosti* [System analysis and security modeling]. Moscow: Vyssh. shk., 2007, 320 p. [In Russian]
4. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Sistemnyy analiz teorii bezopasnosti* [A systematic analysis of the theory of security]. Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova, 2009, 451 p. [In Russian]
5. Kovalenko I. N. *Veroyatnostnyy raschet i optimizatsiya* [Probabilistic calculation and optimization]. Kiev: Naukova dumka, 1989. [In Russian]
6. Bocharov P. P., Pechinkin A. V. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Fizmatlit, 2005, 296 p. [In Russian]
7. Mikhaylov V. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4, pp. 29–39. [In Russian]
8. Barzilovich E. Yu., Kashtanov V. A. *Nekotorye matematicheskie voprosy teorii obsluzhivaniya slozhnykh sistem* [Some mathematical questions of the theory of complex systems maintenance]. Moscow: Sov. radio, 1971, 272 p. [In Russian]
9. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody teorii nadezhnosti* [Mathematical methods of reliability theory]. Moscow: Nauka, 1965, 524 p. [In Russian]
10. Ryabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem* [Reliability and safety of structurally complex systems]. Saint-Petersburg, 2007, 276 p. [In Russian]
11. Severtsev N. A., Savin Yu. A. *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadezhnosti, ustoychivosti i effektivnosti sistem: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N. A. Pilyugina (4–6 iyunya 2019, Elets, Rossiya)* [Fundamental and applied problems of safety, survivability, reliability, stability and efficiency of systems: materials of the III International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician N. A. Pilyugin (June 4–6, 2019, Yelets, Russia)]. Elets, 2019, pp. 392–396. [In Russian]
12. Betskov A. V., Prokop'ev I. V., Shevchenko V. L. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 66–68. [In Russian]

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2)
E-mail: severs@ccas.ru

Severtsev Nikolai Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
Federal research center
"Computer Science and Management"
of the Russian Academy of Sciences
(building 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Дарьина Анна Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2)
E-mail: daryina@ccas.ru

Daryina Anna Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, leading researcher,
Federal research center
"Computer Science and Management"
of the Russian Academy of Sciences
(building 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Северцев, Н. А. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий / Н. А. Северцев, А. Н. Дарьина // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 5–14. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-1.

Н. И. Земцова

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В ПРОБЛЕМЕ МНОГИХ ТЕЛ

N. I. Zemtsova

NEW SOLUTIONS IN THE MANY – BODY PROBLEM

Аннотация. Доказано существование 5-параметрического семейства точных решений дифференциальных уравнений движения в проблеме $(n+1)$ – тел в случае произвольного закона притяжения, зависящего от взаимных расстояний. Геометрический образ данного решения представляет правильный многоугольник с центром P_0 . Тела P_0, P_1, \dots, P_n с массами $m_0, m_1 = m_2 = \dots = m_n = m, n \geq 2$, находящиеся в вершинах многоугольника, вращаются по коническому сечению или движутся по радиусу от центра или к центру в зависимости от начальных условий. При этом решении сохраняется подобие начальной конфигурации при любом t . Рассмотрены радиальные симметричные решения пространственной ньютоновой проблемы многих тел. Такие радиальные решения существуют при условии, что начальные скорости всех тел, находящихся в вершинах правильных многогранников, направлены вдоль соответствующего радиуса-вектора от геометрического центра фигуры или к этому центру.

Ключевые слова: динамические системы, дифференциальные уравнения, симметричные решения, проблема многих тел.

Abstract. We prove the existence of a 5-parametric family of exact solutions of differential equations of motion in $(n+1)$ – body problem in the case of an arbitrary law of attraction that depends on mutual distances. The geometric image of this solution is a regular polygon with the center P_0 . Bodies P_0, P_1, \dots, P_n with masses $m_0, m_1 = m_2 = \dots = m_n = m, n \geq 2$, located at the vertices of the polygon, rotate in a conical section or move in radius from the center or to the center, depending on the initial conditions. In this case, the solution remains similar to the initial configuration for any t . Radial symmetric solutions of the spatial Newton many body problem are considered. Such radial solutions exist provided that the initial velocities of all the bodies, located at the vertices of regular polyhedra, are directed along the corresponding radius vector from the geometric center of the figure or to this center.

Keywords: dynamical systems, differential equations, symmetric solutions, the many-body problem.

Фундаментальной и, к сожалению, до конца не решенной проблемой для науки является проблема устойчивости, безопасности, живучести сложных динамических систем, к которым, безусловно, относятся и гамильтоновы системы, описывающие задачи космической динамики.

Геометрический образ любого решения динамической системы представляет собой некоторую конфигурацию. Особый интерес всегда вызывали решения, обладающие свойствами симметрии и подобия [1, 2], а среди них – гомографические решения. По определению Уинтнера [3], решение задачи n тел называется гомографическим, если конфигурация, образованная этими телами, подобна себе самой для всех $t \geq 0$.

В работах [4, 5] показано, что в плоской ньютоновой проблеме $(n+1)$ – тел P_0, P_1, \dots, P_n с массами $m_0, m_1 = m_2 = \dots = m_n = m, n \geq 2$, образующих в начальный момент правильный многоугольник с центром P_0 , существует 4-параметрическое семейство точных решений, геометрически изображаемых вращающимся вокруг центра P_0 многоугольником, каждая из вершин которого движется по коническому сечению.

Представленные исследования являются обобщением указанных результатов. Доказано существование 5-параметрического семейства точных решений дифференциальных уравнений движения в проблеме $(n+1)$ – тел в случае произвольного закона притяжения, зависящего от взаимных рассто-

яний, т.е. взаимно притягивающих друг друга по закону $F_{ks} \sim \Delta_{ks}^{-(\alpha+1)}$, где F_{ks} – сила взаимного притяжения тел P_k и P_s , Δ_{ks} – их взаимное расстояние, α – произвольный числовой параметр, характеризующий гравитационное потенциальное поле. Рассмотрены также симметричные решения пространственной задачи многих тел.

Дифференциальные уравнения движения тел P_1, \dots, P_n , имеющих одну и ту же массу m , относительно тела P_0 , находящегося в начале координат, в полярных координатах, как и для ньютоновой проблемы, имеют вид [6]

$$\begin{aligned} \ddot{\rho}_k - \rho_k \dot{\lambda}_k^2 + \frac{f\alpha(m_0 + m)}{\rho_k^{\alpha+1}} &= f\alpha m \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq k}}^n \left[\frac{\rho_s \cos(\lambda_s - \lambda_k) - \rho_k}{\Delta_{ks}^{\alpha+1}} - \frac{\cos(\lambda_s - \lambda_k)}{\rho_s^{\alpha+1}} \right], \\ \rho_k \ddot{\lambda}_k + 2\dot{\rho}_k \dot{\lambda}_k &= f\alpha m \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq k}}^n \left(\frac{\rho_s}{\Delta_{ks}^{\alpha+2}} - \frac{1}{\rho_s^{\alpha+1}} \right) \sin(\lambda_s - \lambda_k), \end{aligned} \tag{1}$$

где f – постоянная тяготения, $\Delta_{ks}^2 = \rho_s^2 + \rho_k^2 - 2\rho_s\rho_k \cos(\lambda_s - \lambda_k)$, $k = \overline{1, n}$, $s \neq k$.

Общий порядок системы уравнений (1) равен $4n$.

Справедлива следующая теорема.

Теорема. Решение системы (1), определяемое начальными условиями

$$\rho_k(0) = a_0, \quad \dot{\rho}_k(0) = b_0, \quad \lambda_k(0) = \frac{2\pi(k-1)}{n}, \quad \dot{\lambda}_k(0) = \omega_0, \quad k = \overline{1, n}, \tag{2}$$

одновременно является решением n одинаковых систем 4-го порядка вида

$$\begin{aligned} \ddot{\rho} - \rho \dot{\lambda}^2 &= -A_n \rho^{-(\alpha+1)}, \\ \rho \ddot{\lambda} + 2\dot{\rho} \dot{\lambda} &= 0, \end{aligned} \tag{3}$$

с начальными условиями

$$\rho(0) = a_0, \quad \dot{\rho}(0) = b_0, \quad \lambda(0) = 0, \quad \dot{\lambda}(0) = \omega_0. \tag{4}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \rho_1(t) = \dots = \rho_n(t), \quad \lambda(t) = \lambda_1(t), \\ A_n &= f\alpha \left[m_0 + m 2^{-(\alpha+1)} \sum_{s=2}^n \left(\sin \frac{\pi(s-1)}{n} \right)^{-\alpha} \right], \end{aligned} \tag{5}$$

а $a_0 > 0$, b_0 , ω_0 – произвольные параметры.

Доказательство. Как и в работе [2], введем новые переменные u_k, v_k :

$$u_k = \rho_k - \rho, \quad v_k = \lambda_k - \lambda, \quad k = 2, \dots, n. \tag{6}$$

В новых переменных система (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \ddot{\rho} - \rho \dot{\lambda}^2 &= -\frac{f\alpha(m_0 + m)}{\rho^{\alpha+1}} + f\alpha m \sum_{s=2}^n \left[\frac{(\rho + u_s) \cos v_s - \rho}{\Delta_{1s}^{\alpha+2}} - \frac{\cos v_s}{(\rho + u_s)^{\alpha+1}} \right], \\ \rho \ddot{\lambda} + 2\dot{\rho} \dot{\lambda} &= f\alpha m \sum_{s=2}^n \left[\frac{(\rho + u_s)}{\Delta_{1s}^{\alpha+2}} - \frac{1}{(\rho + u_s)^{\alpha+1}} \right] \sin v_s; \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \ddot{u}_k - \rho(2\dot{\lambda}v_k + v_k^2) - u_k(\dot{\lambda} + v_k)^2 = -f\alpha(m_0 + m) \left[\frac{1}{(\rho + u_k)^{\alpha+1}} - \frac{1}{\rho^{\alpha+1}} \right] + \\
 + f\alpha m \sum_{i=1, i \neq k}^n \left[\frac{(\rho + u_i) \cos(v_i - v_k) - (\rho + u_k) \cos(v_i - v_k)}{\Delta_{ki}^{\alpha+2}} - \frac{\cos(v_i - v_k)}{(\rho + u_i)^{\alpha+1}} \right] - f\alpha m \sum_{s=2}^n \left[\frac{(\rho + u_s) \cos v_s - \rho \cos v_s}{\Delta_{1s}^{\alpha+2}} - \frac{\cos v_s}{(\rho + u_s)^{\alpha+1}} \right], \\
 \rho \ddot{v}_k + u_k(\ddot{\lambda} + \dot{v}_k) + 2\dot{\rho}\dot{v}_k + 2\dot{u}_k(\dot{\lambda} + \dot{v}_k) = f\alpha m \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \left[\frac{\rho + u_i}{\Delta_{ki}^{\alpha+2}} - \frac{1}{(\rho + u_i)^{\alpha+1}} \right] \sin(v_i - v_k) - \\
 - f\alpha m \sum_{\substack{s=2, \\ s \neq k}}^n \left[\frac{\rho + u_s}{\Delta_{1s}^{\alpha+2}} - \frac{1}{(\rho + u_s)^{\alpha+1}} \right] \sin v_s, \\
 \Delta_{ki}^2 = (\rho + u_k)^2 + (\rho + u_i)^2 - 2(\rho + u_k)(\rho + u_i) \cos(v_i - v_k), \\
 \Delta_{1s}^2 = \rho^2 + (\rho + u_s)^2 - 2\rho(\rho + u_s) \cos v_s, \quad k, i = \overline{1, n}, \quad s = \overline{2, n}.
 \end{aligned} \tag{7''}$$

Система (7) имеет тот же порядок $4n$ и состоит из двух подсистем: подсистемы 4-го порядка (7') из первых двух уравнений и подсистемы (7'') порядка $4n-4$ с неизвестными функциями u_k, v_k . Покажем, что при любой дифференцируемой функции $\rho(t)$ подсистема (7'') имеет частное решение

$$\begin{aligned}
 u_2(t) = \dots = u_n(t) = u(t) \equiv 0, \\
 v_k(t) = \frac{2\pi(k-1)}{n}, \quad k = 2, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Для этого будем искать частное решение в виде

$$u_2(t) = \dots = u_n(t) = u(t) \equiv 0, \quad v_k(t) = \frac{2\pi(k-1)}{n}$$

с начальными условиями

$$u(0) = \dot{u}(0) = \dot{v}_k(0) = \dot{v}(0) = 0, \quad v_k(0) = \frac{2\pi(k-1)}{n}.$$

Вместо подсистемы (7'') получим следующую систему дифференциальных уравнений порядка $4n-4$:

$$\begin{aligned}
 \ddot{u} - u\dot{\lambda}^2 = -f\alpha(m_0 + m) \left[\frac{1}{(\rho + u)^{\alpha+1}} - \frac{1}{\rho^{\alpha+1}} \right] + f\alpha m \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \left[\frac{(\rho + u) \cos \frac{2\pi(i-k)}{n} - (\rho + u) \cos \frac{2\pi(i-k)}{n}}{\Delta_{ki}^{\alpha+2}} - \frac{\cos \frac{2\pi(i-k)}{n}}{(\rho + u)^{\alpha+1}} \right] - \\
 - f\alpha m \sum_{s=2}^n \left[\frac{(\rho + u) \cos \frac{2\pi(s-1)}{n} - (\rho + u) \cos \frac{2\pi(s-1)}{n}}{\Delta_{1s}^{\alpha+2}} - \frac{\cos \frac{2\pi(s-1)}{n}}{(\rho + u)^{\alpha+1}} \right], \\
 u\ddot{\lambda} + 2\dot{u}\dot{\lambda} = f\alpha m \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \left[\frac{\rho + u}{\Delta_{ki}^{\alpha+2}} - \frac{1}{(\rho + u)^{\alpha+1}} \right] \sin \frac{2\pi(i-k)}{n} - f\alpha m \sum_{s=2}^n \left[\frac{\rho + u}{\Delta_{1s}^{\alpha+2}} - \frac{1}{(\rho + u)^{\alpha+1}} \right] \sin \frac{2\pi(s-1)}{n}, \\
 \Delta_{ki} = 2(\rho + u) \left| \sin \frac{\pi(i-k)}{n} \right|, \quad \Delta_{1s} = 2 \sin \frac{\pi(s-1)}{n}, \quad i \neq k, \quad k, s = 2, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Левые части системы (9) не зависят от индекса k , поэтому необходимо доказать, что для каждого $k = 2, \dots, n$ подсистема из двух уравнений системы (9) имеет решение

$$u(t) \equiv 0, \quad v_k(t) = \frac{2\pi(k-1)}{n}.$$

Это утверждение равносильно выполнению для любого $k = 2, \dots, n$ следующих тождеств:

$$\begin{aligned}
 & -2^{-(\alpha+1)} \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \left| \sin \frac{\pi(i-k)}{n} \right|^{-\alpha} - \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \cos \frac{2\pi(i-k)}{n} + 2^{-(\alpha+1)} \sum_{s=2}^n \left| \sin \frac{\pi(s-1)}{n} \right|^{-\alpha} - \sum_{s=2}^n \cos \frac{2\pi(s-1)}{n} = 0, \quad (10) \\
 & -2^{-(\alpha+2)} \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \sin \frac{2\pi(i-k)}{n} \left| \sin \frac{\pi(i-k)}{n} \right|^{-(\alpha+2)} - \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \sin \frac{2\pi(i-k)}{n} - \\
 & -2^{-(\alpha+1)} \sum_{s=2}^n \cos \frac{\pi(s-1)}{n} \left(\sin \frac{\pi(s-1)}{n} \right)^{-(\alpha+1)} + \sum_{s=2}^n \sin \frac{2\pi(s-1)}{n} = 0.
 \end{aligned}$$

Справедливость этих тождеств проверяется непосредственно.

Таким образом, показано, что система уравнения (9) имеет частное решение $u(t) \equiv 0$, $v_k(t) = \frac{2\pi(k-1)}{n}$. Для нахождения частного решения всей системы (7) необходимо проинтегрировать

подсистему (7') после подстановки в нее $u_s = 0$, $v_s = \frac{2\pi(s-1)}{n}$ с учетом начальных условий (2).

После выполнения достаточно простых преобразований подсистема (7') принимает вид системы (3) и ее интегрирование выполняется в квадратурах. Второе уравнение системы (3) имеет первый интеграл

$$\rho^2 \dot{\lambda} = d_0 = a_0^2 \omega_0. \quad (11)$$

Используя это соотношение, первое уравнение системы (3) можно записать в виде равенства

$$\ddot{\rho} = d_0^2 \rho^{-3} - A_n \rho^{-(\alpha+1)}.$$

Далее будем иметь

$$\pm \sqrt{\alpha} \int \frac{\rho d\rho}{\sqrt{2h\alpha\rho^2 + 2A_n\rho^{2-\alpha} - d_0^2\alpha}} = t + C_1, \quad (12)$$

где $2h = b_0^2 + a_0^2 \omega_0^2 - 2A_n \alpha^{-1} a_0^{-\alpha}$, C_1 – произвольная постоянная.

Из выражения (11) в принципе можно найти зависимость полярного угла λ как функции t :

$$\lambda(t) = d_0 \int \frac{dt}{\rho^2(t)}. \quad (13)$$

Зависимость $\lambda = \lambda(\rho)$ выражается интегралом, являющимся уравнением «орбиты»:

$$\lambda(\rho) = \pm d_0 \sqrt{\alpha} \int \frac{d\rho}{\rho \sqrt{2h\alpha\rho^2 + 2A_n\rho^{2-\alpha} - d_0^2\alpha}}. \quad (14)$$

Таким образом, соотношения (12), (13) дают полное решение задачи.

Из соотношения (11) видно, что $\dot{\lambda} \neq \text{const}$, т.е. многоугольник P_1, P_2, \dots, P_n , оставаясь в любой момент правильным, но переменных размеров, вращается с переменной угловой скоростью вокруг геометрического центра P_0 , причем угловая скорость его вращения в любой момент t определяется интегралом (13). С увеличением размеров многоугольника его угловая скорость вращения уменьшается, и наоборот.

Рассмотрим различные варианты решений этой задачи.

1. Круговые решения плоской ньютоновой проблемы.

Если $b_0 = 0$ и $\omega_0 = \pm \sqrt{\frac{A_n}{a_0^3}}$, тогда правильный n -угольник со стороной $2a_0 \sin \frac{\pi}{n}$, оставаясь ин-

вариантным в размерах, будет вращаться вокруг центра P_0 с постоянной угловой скоростью ω_0 [4, 7, 8].

2. Радиальные решения плоской ньютоновой проблемы.

Если начальная скорость $\omega_0 = 0$, т.е. в начальный момент начальные скорости тел P_1, P_2, \dots, P_n направлены коллинеарно соответствующему начальному радиусу-вектору, то величина $d_0 = 0$ и

$$\dot{\lambda}(t) \equiv 0. \tag{15}$$

Это означает, что многоугольник будет себе подобно увеличиваться или уменьшаться в размерах в соответствии с интегралом (12), но будет отсутствовать всякое вращение. В этом случае, например при $n = 4n_0$, возможно симметричное решение, в котором некоторые тела движутся сначала к центру, а другие – от центра. При $n_0 = 3$ решение изображено на рис. 1.

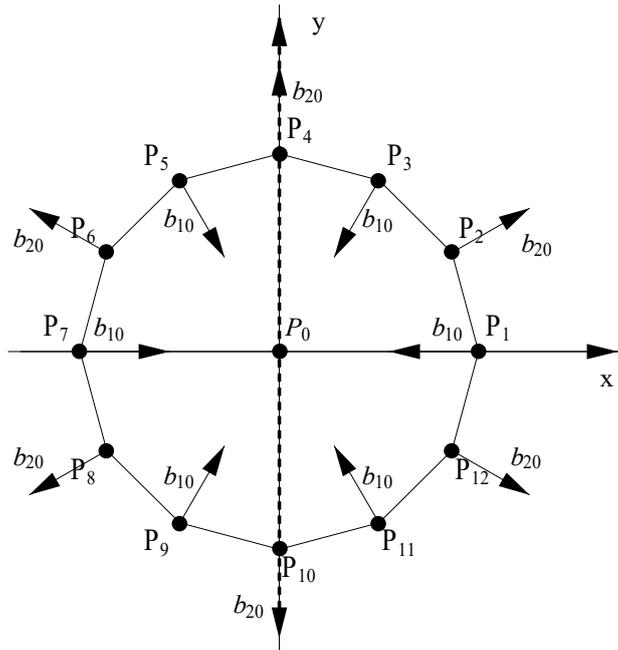


Рис. 1. Симметричное решение для $n_0 = 3$

Это решение представляет собой «выпукло-вогнутое» пространство. Для точек, имеющих начальную скорость b_{10} , следует в приближенном для этого случая соотношении (3) взять знак минус, а для точек с начальной скоростью b_{20} – знак плюс.

Эта конфигурация интересна тем, что она не будет представлять собой для всех t выпуклый правильный многоугольник.

3. Симметричные решения пространственной проблемы многих тел.

Известно, что в трехмерном пространстве существует лишь пять правильных многогранников, так называемых тел Платона [9]. Это тетраэдр (число вершин – 4), куб (число вершин – 8), октаэдр (число вершин – 6), икосаэдр (число вершин – 20), додекаэдр (число вершин – 12).

Вследствие этого можно утверждать, что радиальные симметричные решения пространственной ньютоновой проблемы многих тел могут существовать, по меньшей мере, для $n = 4, 6, 8, 12, 20$, т.е. для проблем пяти, семи, девяти, тринадцати и двадцати взаимно притягивающих друг друга в соответствии с законом притяжения $P_{ki} \sim \Delta_{ki}^{-2}$.

Такие радиальные решения существуют при условии, что начальные скорости всех тел, находящихся в вершинах перечисленных многогранников, направлены вдоль соответствующего радиуса-вектора от геометрического центра фигуры (начала координат – P_0) или к этому центру [10–12].

Дифференциальное уравнение движения каждого из n -тел вдоль радиуса-вектора имеет вид

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{f[m_0 + A(m, n)]}{r^2} = 0, \tag{16}$$

где параметрическая функция $A(m, n)$ для каждого многогранника различна. Например, для куба

$$A(m, 8) = \frac{(3\sqrt{3} + 3\sqrt{6} + \sqrt{2})m}{4\sqrt{2}}. \quad (17)$$

Уравнение (16) необходимо решать с учетом начальных условий

$$r(0) = a_0, \quad \dot{r}(0) = b_0. \quad (18)$$

Если $b_0 > 0$, то соответствующий многогранник будет подобно себе расширяться (по крайней мере на начальном отрезке времени, а при достаточно больших значениях b_0 будет постоянно расширяться. Если же $b_0 < 0$, многогранник будет подобно себе уменьшаться в размерах до полного вырождения в точку, а при некотором $t^* > 0$ наступит одновременное соударение всех точек в начале координат P_0 .

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-03061-мк).

Библиографический список

1. Северцев, Н. А. Модели программного обеспечения в безопасном и надежном функционировании сложной космической системы / Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4. – С. 5–13.
2. Лагранж, Ж. Аналитическая механика / Ж. Лагранж. – Москва : Наука, 1957.
3. Уинтнер, А. Аналитические основы небесной механики / А. Уинтнер. – Москва : Наука, 1967.
4. Гребеников, Е. А. Методы компьютерной алгебры в проблеме многих тел / Е. А. Гребеников, Д. Козак-Сковородкин, М. Якубяк. – Москва : Из-во РУДН, 2002.
5. Гребеников, Е. А. Математические проблемы гомографической динамики / Е. А. Гребеников. – Москва : МАКС Пресс, 2010.
6. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / под ред. Г. Н. Дубошина. – Москва : Наука, 1976.
7. Elmabsout, B. Stability of Some Degenerate Positions of Relative Equilibrium in the n – Body Problem / B. Elmabsout // Dynamics and Stability of System. – 1994. – Vol. 9, № 4. – P. 305–319.
8. Prokopenya, A. N. Symbolic-numerical analysis of the relative equilibria stability in the planar circular restricted four-body problem / A. N. Prokopenya // Lecture notes in computer science. – Springer-Verlag GmbH, 2017. – V. 10490 LNCS. – P. 329–345.
9. Александров, А. Д. Выпуклые многогранники / А. Д. Александров. – Москва ; Ленинград : ГИТТЛ, 1950.
10. Журавлев, С. Г. Гомотетические радиальные решения ньютоновой общей пространственной задачи $n + 1$ тел / С. Г. Журавлев // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80, № 1. – С. 46–50.
11. Земцова, Н. И. Новые гомографические решения в пространственной ньютоновой проблеме шести тел / Н. И. Земцова // Теоретические и прикладные задачи нелинейного анализа. – Москва : ВЦ РАН, 2013. – С. 95–99.
12. Диарова, Д. М. Компьютерное моделирование в качественных исследованиях динамических систем / Д. М. Диарова, Н. И. Земцова // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем : сб. – Елец : ЕГУ им. И. А. Бунина, 2017. – С. 154–160.

References

1. Severtsev N. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4, pp. 5–13. [In Russian]
2. Lagranzh Zh. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical mechanics]. Moscow: Nauka, 1957. [In Russian]
3. Uintner A. *Analiticheskie osnovy nebesnoy mekhaniki* [Analytical foundations of celestial mechanics]. Moscow: Nauka, 1967. [In Russian]
4. Grebenikov E. A., Kozak-Skovorodkin D., Yakubyak M. *Metody komp'yuternoy algebry v probleme mnogikh tel* [Computer algebra methods in the many-body problem]. Moscow: Iz-vo RUDN, 2002. [In Russian]
5. Grebenikov E. A. *Matematicheskie problemy gomograficheskoy dinamiki* [Mathematical problems of homographic dynamics]. Moscow: MAKS Press, 2010. [In Russian]
6. *Spravochnoe rukovodstvo po nebesnoy mekhanike i astroydinamike* [Reference guide to celestial mechanics and astrodynamics]. Ed. by G. N. Duboshin. Moscow: Nauka, 1976. [In Russian]
7. Elmabsout B. *Dynamics and Stability of System*. 1994, vol. 9, no. 4, pp. 305–319.

8. Prokopenya A. N. *Lecture notes in computer science*. Springer-Verlag GmbH, 2017, vol. 10490 LNCS, pp. 329–345.
9. Aleksandrov A. D. *Vypuklye mnogogranniki* [Convex polyhedra]. Moscow; Leningrad: GITTL, 1950. [In Russian]
10. Zhuravlev S. G. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied mathematics and mechanics]. 2016, vol. 80, no. 1, pp. 46–50. [In Russian]
11. Zemtsova N. I. *Teoreticheskie i prikladnye zadachi nelineynogo analizan* [Theoretical and applied problems of nonlinear analysis]. Moscow: VTs RAN, 2013, pp. 95–99. [In Russian]
12. Diarova D. M., Zemtsova N. I. *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadezhnosti, ustoychivosti i effektivnosti sistem: sb.* [Fundamental and applied problems of safety, survivability, reliability, stability and efficiency of systems: coll.]. Elets: EGU im. I. A. Bunina, 2017, pp. 154–160. [In Russian]

Земцова Надежда Ивановна

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2)
E-mail: zemni@yandex.ru

Zemtsova Nadezhda Ivanovna

candidate of physical and mathematical sciences,
senior researcher,
Federal research center
"Computer Science and Management"
of the Russian Academy of Sciences
(building 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Земцова, Н. И. Новые решения в проблеме многих тел / Н. И. Земцова // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 15–21. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-2.

С. В. Козлов

**ПРОЦЕССНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СОЗДАНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

S. V. Kozlov

**PROCESS ASPECTS OF IMPROVING THE QUALITY OF CREATING INTELLIGENT
INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEMS**

Аннотация. Актуальность и цели. Создание и развитие интегрированных систем управления направлено на обеспечение их адекватного реагирования на угрозы и опасности в сфере применения систем. По мере развития технологий, применяемых при создании интегрированных систем, одновременно расширяются горизонты внешних и внутренних угроз и опасностей. В этой связи реализация свойств многофункциональности создаваемых интегрированных систем на основе объединения разнородных функциональных систем и обеспечения их совместной работы в составе системы управления является актуальной научно-технической задачей. Качественно новые возможности интегрированным системам управления дает применение в их составе робототехнических систем. Их создание в составе системы управления требует определения общей организационной и системотехнической основы. Целью работы является уточнение парадигмы создания интегрированных систем управления в части обоснования необходимости комплексного применения функциональных и процессных методов современного менеджмента. *Материалы и методы.* Рассматривается новый подход к формированию сквозного процесса на основе взаимоувязанной совокупности организационных, организационно-ресурсных и технико-технологических процессов в жизненном цикле интегрированных систем управления. Вводится категория полной группы процессов в целях сосредоточения и координации деятельности всех субъектов государственного заказа по разработке интегрированных систем на формирование рациональной организации сквозного процесса и на этой основе на повышение качества создания интегрированных систем управления. *Выводы.* Определение процессной основы для создания и развития интегрированных систем с представлением полной группы процессов в их цикле и универсальной схемы декомпозиции целевых и противодействующих процессов позволит проводить моделирование взаимодействия на уровне элементов сквозного процесса, выявление уязвимостей на стыке процессов и обоснование предложений по их устранению.

Abstract. *Background.* The creation and development of integrated management systems is aimed at ensuring their adequate response to threats and dangers in the field of systems application. With the development of technologies used in creating integrated systems, the horizons of external and internal threats and dangers are simultaneously expanding. In this regard, the implementation of the multifunctional properties of the integrated systems created on the basis of combining heterogeneous functional systems and ensuring their joint operation as part of the management system is an urgent scientific and technical task. The use of robotic systems in integrated control systems provides qualitatively new opportunities. Their creation as part of a management system requires defining a common organizational and system-technical basis. The purpose of this work is to clarify the paradigm of creating integrated management systems in terms of justifying the need for a comprehensive application of functional and process methods of modern management. *Materials and methods.* The article considers a new approach to the formation of a cross-cutting process based on an interconnected set of organizational, organizational-resource and technical-technological processes in the life cycle of integrated management systems. The category of a complete group of processes is introduced in order to focus and coordinate the activities of all subjects of the state order for the development of integrated systems for the formation of a rational organization of the end-to-end process and, on this basis, to improve the quality of creating integrated management systems. *Conclusions.* Defining the process basis for creating and developing integrated systems with the representation of a complete group of processes in their lifecycle and a universal scheme for decomposing target and counteracting processes will allow modeling interaction at the level of elements of the end-to-end process, identifying vulner abilities at the interface of processes and justifying proposals for their elimination.

Ключевые слова: парадигма создания интегрированных систем управления, функциональный и процессный подходы, жизненный цикл, полная группа процессов, универсальная схема декомпозиции процессов.

Keywords: paradigm for creating integrated management systems, functional and process approaches, life cycle, complete group of processes, universal scheme for processes decomposition.

Общие положения

Современные тенденции к расширению функциональности систем управления различного назначения связаны с необходимостью обеспечения их инвариантности к широкому перечню угроз и опасностей в сфере ответственности конкретной системы управления. Создание интегрированных систем управления (ИСУ) с реализацией принципов сетцентрического управления при использовании широкого перечня разнородных ресурсов, средств и технологий приобретает высокую актуальность и практическую важность. При этом применение в составе интегрированных систем управления робототехнических систем и комплексов в виде совокупности управляющих и исполнительных систем выводит проблему повышения качества ИСУ на новый уровень. Внедрение робототехнических систем и комплексов в состав интегрированных систем целесообразно проводить поэтапно:

- 1) применение исполнительных элементов робототехнических систем, встраиваемых в функциональные системы в составе ИСУ;
- 2) применение отдельных робототехнических функциональных систем в составе ИСУ;
- 3) применение автономных интеллектуальных робототехнических функциональных систем, действующих на удалении от центра управления ИСУ и координируемых в ее составе;
- 4) применение сетевых интеллектуальных робототехнических систем в качестве основы ИСУ.

Важно отметить, что по мере роста сложности интегрированных систем появляется необходимость уточнения подходов всех субъектов государственного заказа (заказчиков, разработчиков и пользователей) к планированию и организации их жизненного цикла.

Традиционный подход к созданию сложных систем на основе функциональной интеграции разнородных систем, разрабатываемых на основе перспективных технологий шестого уклада мировой экономики [1, 2], имеет целью сформировать структуру интегрированной системы. Функциональный подход разработчика, отвечая на вопрос «что надо сделать?», вполне соответствовал периоду создания узкоспециализированных, монофункциональных управляющих систем и систем с малой степенью интеграции функций при создании комплексных систем управления типа «Command, Control, ...» (C^2 , C^3) в 70–80-е гг. XX в. [3]. В таких системах реализация функционального процесса осуществлялась обычно в пределах не более двух-трех структурных элементов.

В связи с расширением задач, повышением их сложности и наукоемкости основной тенденцией в развитии систем управления стало увеличение их функциональности, обусловленное необходимостью своевременного и качественного решения оперативно возникающих задач в широком спектре проблем управления. Опережающее развитие угроз в инфокоммуникационной сфере и расширение горизонтов их появления по мере развития применяемых технологий определяет необходимость решения новых проблем по устранению уязвимостей на стыке функциональных систем. В этой связи в последние 10–15 лет получил широкое распространение и практическое применение процессный подход, реализация которого в отличие от функционального подхода осуществляется под девизом «как надо сделать?», что позволяет не только по-новому подойти к решению проблем обеспечения слаженного взаимодействия функциональных систем в составе интегрированной системы, но и, рассматривая управление как непрерывный процесс, разворачивающийся во времени, формировать, проводить анализ и оптимизацию сквозных процессов на протяжении жизненного цикла системы [4–6]. Современные системы менеджмента качества базируются на принципах TQM.

Анализ и обобщение особенностей практического применения методов процессного подхода в области создания и развития систем управления различного назначения свидетельствуют о том, что в настоящее время его применение с нормативно-методической точки зрения регламентировано применительно к бизнес-процессам в жизненном цикле любых объектов разработки и, в основном, в производственной сфере. Об этом в настоящее время свидетельствует и действующая система менеджмента качества продукции. В работах [7, 8] показаны основные направления эволюции процессного подхода в области создания и развития систем управления как высокотехнологичных объ-

ектов разработки в рамках государственного заказа с учетом необходимости преодоления ограничений системного подхода, отмеченных в работе [9].

Уточнение парадигмы исследования интегрированной системы управления

Ретроспективный анализ систем управления различного назначения позволяет в их развитии условно выделить несколько стадий, как показано на рис. 1 и в табл. 1:

– в начале это были узкоспециализированные системы, направленные на реализацию нескольких разобобщенных функций в условиях достаточной степени определенности применения системы управления;

– далее началось создание комплексных систем, реализующих процессы информатизации органов управления и автоматизации деятельности их должностных лиц (по существу это была первая стадия классической интеграции: новые задачи – новая структура системы управления);

– исходя из появления новых технологий – производилось наращивание функциональных возможностей комплексных систем управления на основе использования готовых к совместному применению новых функциональных подсистем (например, подсистем навигации, ориентирования, опознавания и др.) на базе системы CASE-технологий;

– основным содержанием работ на второй стадии стала интеграция на уровне бизнес-процессов;

– учитывая общую тенденцию повышения роли процессного подхода к созданию высокотехнологичных систем управления, на последующей стадии прогнозируется расширение области интеграции в направлении увеличения перечня рассматриваемых процессов в жизненном цикле системы управления.



Рис. 1. Эволюция от монофункциональных систем до интегрированных многофункциональных систем управления

На основе такого представления ретроспективы развития систем управления как объектов исследования и разработки можно показать эволюцию объекта и предмета исследования по такой тематике.

Таблица 1

Эволюция объекта и предмета исследований по тематике интегрированных систем управления

Стадии интеграции элементов системы управления	Основные признаки стадии интеграции	Предмет исследования	Методы исследования
Типовой объект исследования (на 1-й и 2-й стадии интеграции элементов)	Система управления как взаимоувязанная совокупность органов, центров управления и средств управления	Бизнес-процессы в жизненном цикле. Системотехника	Функциональный подход к созданию интегрированных систем управления. Системная инженерия
Современный объект исследования (на 3-й стадии интеграции элементов)	Интегрированная система управления как многофункциональная система на уровне органов, центров и средств управления	Полная группа процессов в жизненном цикле	Процессный и проектный подходы. Системная инженерия

Так, например, на 1-й и 2-й стадиях интеграции система управления как объект исследования представляется в виде взаимоувязанной совокупности органов, центров и средств управления, а предмет исследования составляют бизнес-процессы и системотехника для их реализации. Основными методами исследований являются методы функционального подхода и системной инженерии.

В настоящее время объектом исследования должна стать интегрированная система управления как многофункциональная система на уровне элементов системы управления, рассматриваемых на второй стадии. При этом предмет исследования должен рассматриваться практически полностью на уровне процессов в жизненном цикле системы управления, а методы исследования – на основе процессного и проектного подходов и системной инженерии.

Еще четверть века тому назад такая интеграция ограничивалась тремя, максимум четырьмя видами функциональных систем, а обеспечение их совместного функционирования достигалось за счет применения системы протоколов и различного рода шлюзов. Дальнейшее расширение функциональности интегрированных систем приводило к возрастанию сложности обеспечения совместности их компонентов, а одновременное развитие противодействующих факторов, порой опережающее развитие интегрированных систем, становилось серьезным препятствием на пути повышения эффективности управленческой деятельности органов управления.

Инфокоммуникационная сфера в настоящее время является весьма уязвимой в отношении современных угроз и прогнозируемых опасностей. По мере развития технологий наблюдается интенсивное расширение горизонтов угроз, рост объемов разнородной, а часто и противоречивой информации о текущих угрозах. Складывается противоречивая ситуация, в которой в условиях нарастания внешних угроз лавинообразно растет сложность организации и обеспечения эффективной деятельности органов управления, что становится причиной появления и вторичных угроз внутрисистемного порядка.

Существующие ограничения системного подхода [9], связанные с недостаточной определенностью предметной сферы проведения исследований, с непротиворечивостью исходных данных и целостностью рассматриваемого объекта исследований, проявляются в том, что создаваемые изделия не в полной мере будут соответствовать условиям их применения. Учитывая особую важность управления во всех сферах жизни и деятельности личности, общества и государства и высокую сложность создаваемых современных систем управления различного назначения, такое положение становится сдерживающим фактором при создании многофункциональных интегрированных систем управления.

Классификация процессов в жизненном цикле интегрированных систем управления

Анализ опыта разработки и применения систем управления различного масштаба и принадлежности позволяет выделить системы управления из общего перечня объектов, создаваемых в рамках государственного заказа, и показать особенности формирования сквозного процесса в их жизненном цикле. На рис. 2 иллюстрирована процессная основа применительно к системе управления

[10–12]. Полагая, что система управления по определению представляет собой совокупность органов, центров и средств управления, поставим им в соответствие организационные, организационно-ресурсные и технико-технологические процессы, обеспечивающие реализацию целевого предназначения системы управления.

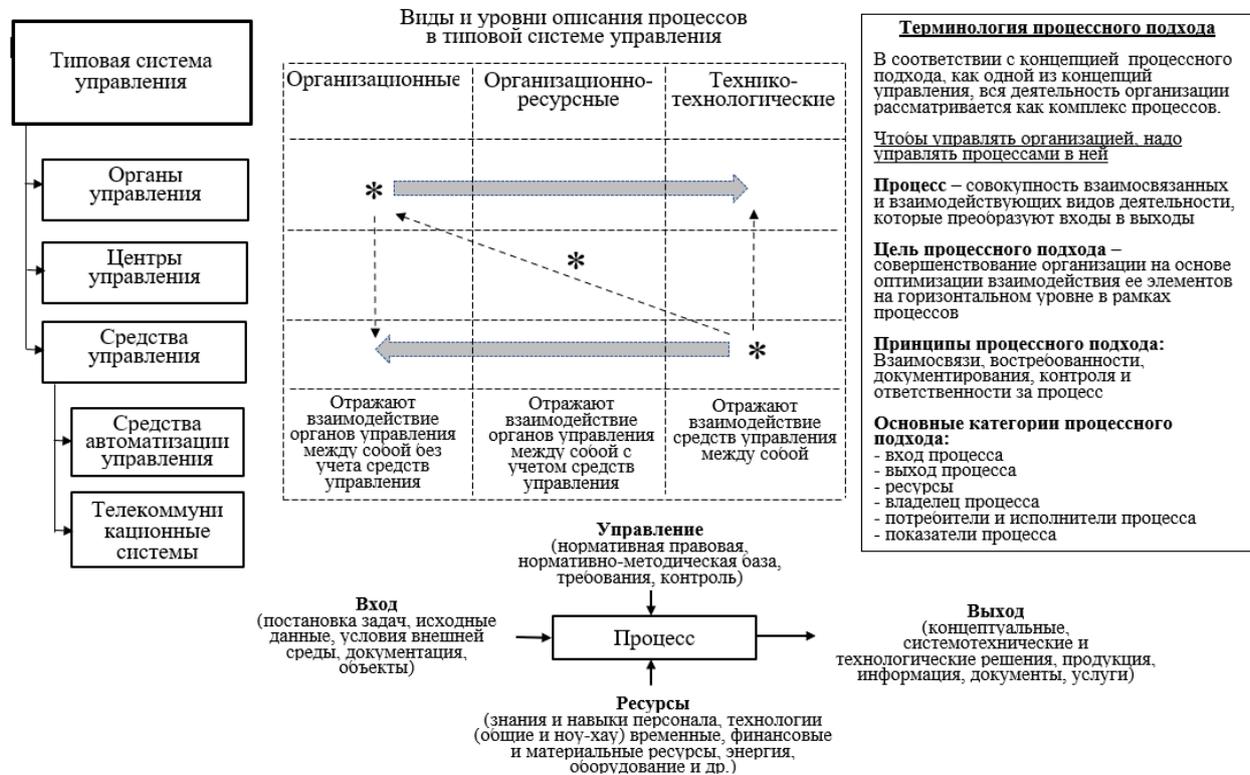


Рис. 2. Основные положения процессного подхода к системе управления

Терминология и категории процессного подхода, основные направления взаимодействия указанных видов процесса представлены на рис. 2. Необходимо отметить, что организационные процессы, формируемые в соответствии с целями и задачами системы управления, определяют требования к организационно-ресурсным и технико-технологическим процессам, в свою очередь, технико-технологические и организационно-ресурсные процессы определяют реализуемость организационных процессов. В практике проведения научных исследований по обоснованию системотехнических и технологических решений по созданию интегрированных систем управления процедура оптимизации взаимодействия процессов носит итерационный характер. Участниками проведения такой процедуры должны быть основные субъекты государственного заказа по созданию ИСУ: заказчик, разработчик и пользователь.

С учетом позиционирования процессов по отношению к элементам системы управления (см. рис. 2) их перечень и общее содержание представлены в табл. 2.

На такой же методической основе определения видов процессов, направленных на реализацию целевого предназначения ИСУ, предлагается представить структуру противодействующего процесса на протяжении ее жизненного цикла, т.е.:

– организационные процессы, отражающие взаимодействие органов управления противодействующей стороны по планированию и организации негативного воздействия на целевой процесс в жизненном цикле ИСУ;

– организационно-ресурсные процессы, отражающие взаимодействие органов управления между собой с применением средств управления (информационных, когнитивных и технических ресурсов) для реализации негативного воздействия;

– технико-технологические процессы, отражающие взаимодействие средств управления между собой при реализации негативного воздействия на средства управления в составе ИСУ.

Таблица 2

Классификация процессов в жизненном цикле ИСУ

Элементы системы управления	Виды процессов	Признак классификации процессов
Органы управления	Организационные (административные или бизнес-процессы)	Взаимодействие органов управления, подразделений, должностных лиц, специалистов между собой без учета применения средств управления
Центры управления	Организационно-технические процессы	Взаимодействие органов управления подразделений, должностных лиц, специалистов между собой с учетом применения средств управления
	Организационно-информационные процессы	Взаимодействие органов управления подразделений, должностных лиц, специалистов между собой с учетом применения средств управления информационными ресурсами
	Организационно-когнитивные процессы	Взаимодействие органов управления подразделений, должностных лиц, специалистов между собой с учетом применения средств управления ресурсами знаний
Средства управления	Технико-технологические процессы	Взаимодействие средств управления между собой без участия человека-оператора

Важным условием при обосновании направлений повышения качества создания интегрированных систем управления является определение полной группы процессов в их жизненном цикле. Учитывая структуру целевого процесса, развернутого на протяжении жизненного цикла, полная группа может быть представлена в следующем виде (рис. 3). При этом на протяжении жизненного цикла рассматриваются элементы основного и обеспечивающего процессов.

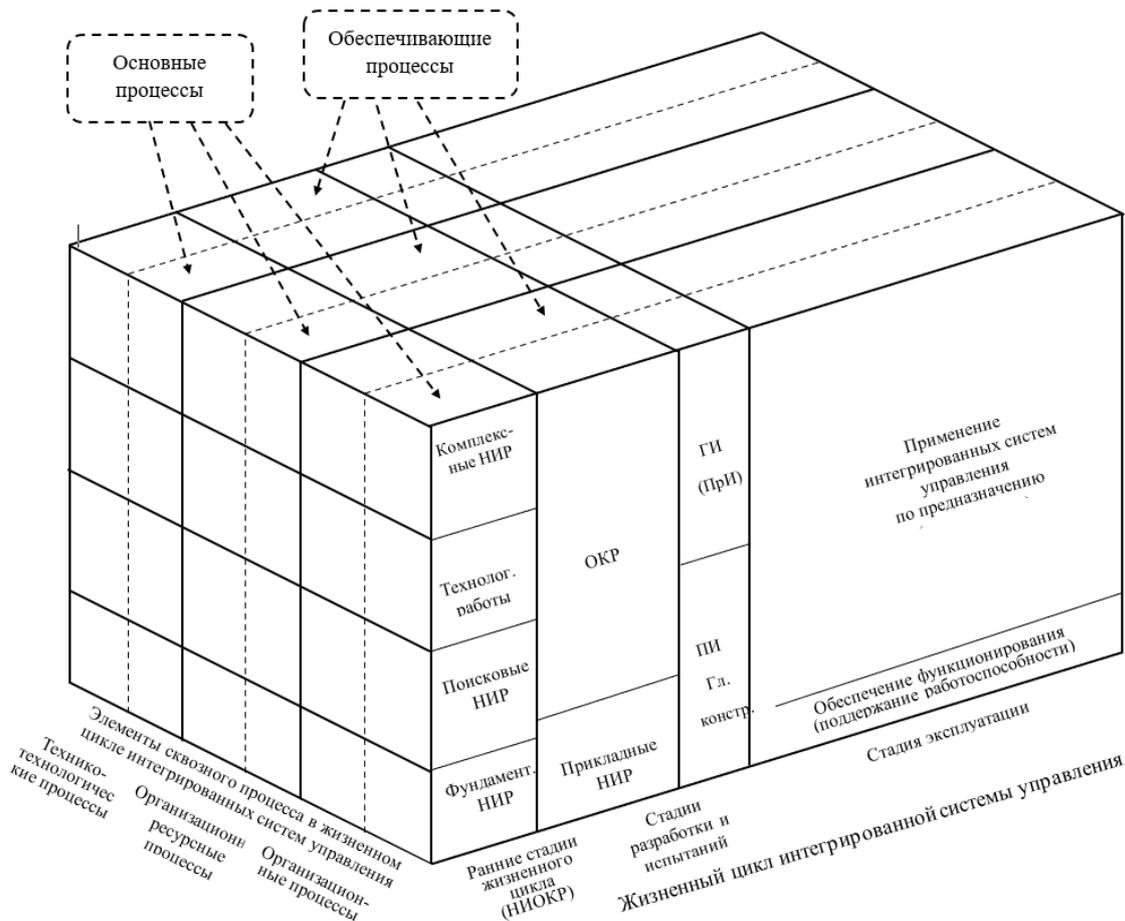


Рис. 3. Представление полной группы процессов в жизненном цикле интегрированной системы управления

На ранних стадиях жизненного цикла ИСУ достижение сбалансированного по целям и задачам требуемого уровня создаваемой системы, доступных технологий, а также с учетом материальных, финансовых ресурсов и времени, в рамках фундаментальных, поисковых и прикладных исследований проводится обоснование рационального облика системы и основных системотехнических и технологических решений по ее созданию [12–16], при необходимости может проводиться моделирование взаимодействия элементов целевого и противодействующего процессов с учетом их атрибутов (преобразование входных параметров в выходные параметры процесса под управлением процедуры использования ресурсов для реализации процесса), с применением разработанной в работе [10] имитационной модели, в ходе которого осуществляется выявление уязвимостей на стыке процессов.

Заключение

Развитие интегрированных систем управления целесообразно проводить на основе комплексного применения методов функционального и процессного подходов, что обеспечивает возможность одновременного проектирования организационной структуры (функциональных областей интегрированной системы управления) и порядка взаимодействия элементов системы в рамках этой структуры, представляемого в виде полной группы процессов. Необходимо отметить, что процессный подход, по существу, подводит к переходу на формирование ресурсосберегающей организационной структуры.

Определение процессной основы для создания и развития интегрированных систем с представлением полной группы процессов в их жизненном цикле и универсальной схемы декомпозиции целевых и противодействующих процессов позволит проводить моделирование взаимодействия на уровне идентичных и перекрестных элементов сквозного процесса, проводить выявление уязвимостей на стыке процессов и обоснование предложений по их устранению.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-03061-мк).

Библиографический список

1. *Авербух, В. М.* Шестой технологический уклад и перспективы России (краткий обзор) / В. М. Авербух // Вестник СтавГУ. – 2010. – № 71. – С. 159–166.
2. Хронология и характеристика технологических укладов. – URL: <http://pochit.ru/himiya/77605/index.html> (дата обращения: 11.05.2020).
3. Command and Control. – URL: <https://www.encyclopedia.com/social-sciences-and-law/sociology-and-social-reform/sociology-general-terms-and-concepts/command-and-control-systems> (дата обращения: 12.05.2020).
4. Современные научные подходы в менеджменте (процессный, системный, ситуационный). – URL: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018004430> (дата обращения: 20.05.2020).
5. *Репин, В. В.* Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2013. – 544 с.
6. Этапы развития процессного подхода к управлению организацией, методологией описания процессов и их основоположники. – URL: <https://infopedia.su/4x10dc.html> (дата обращения: 29.07.2018).
7. *Евдокимова, Е. Н.* Эволюция процессного подхода в управлении и перспективы его развития / Е. Н. Евдокимова // Управление экономическими системами. – 2011. – № 4 (28). – С. 117–124. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16335749> (дата обращения: 11.05.2020).
8. *Козлов, С. В.* Об эволюции методов процессного подхода к развитию автоматизированных информационно-управляющих систем / С. В. Козлов, А. Н. Кубанков. // Качество. Инновации. Образование. – 2018. – № 5 (156). – С. 103–110.
9. *Пригожин, А. И.* Методы развития организаций / А. И. Пригожин. – Москва : МЦФЭР, 2003. – 864 с.
10. *Kozlov, S. V.* Methodological Approaches to Multi-Process Modeling of the Lifecycle of Auto-mated Control Systems / S. V. Kozlov, A. N. Kubankov // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) (Saint-Petersburg, 26–30 Nov. 2018). – Saint-Petersburg, 2018. – DOI 10.1109/WE-CONF.2018.8604445.
11. Информационное пространство цифровой экономики России. Концептуальные основы и проблемы формирования / А. А. Зацаринный [и др.]. – Москва : Изд-во ООО «НИПКЦ Восход-А», 2018. – 236 с.
12. *Козлов, С. В.* Процессные основы интеграции и комплексного развития информационных, управляющих роботизированных, телекоммуникационных систем / С. В. Козлов, А. Н. Кубанков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 23–31.
13. *Гришко, А. К.* Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени / А. К. Гришко, А. В. Лысенко, С. А. Моисеев // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 40–45. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5.

14. Дивеев, А. И. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 40–47. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-4.
15. Дивеев, А. И. Эволюционный метод решения задачи оптимального управления для повышения качества группового взаимодействия роботов / А. И. Дивеев, А. А. Котова // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 60–68.
16. Дивеев, А. И. Синтез системы управления группой роботов методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 198.

References

1. Averbukh V. M. *Vestnik StavGU* [The Sixth Technological Order and Prospects of Russia (a brief overview)]. 2010, no. 71, pp. 159–166. [In Russian]
2. *Khronologiya i kharakteristika tekhnologicheskikh ukkladov* [Chronology and characteristics of technological structures]. Available at: <http://pochit.ru/himiya/77605/index.html> (accessed 11.05.2020). [In Russian]
3. *Command and Control*. Available at: <https://www.encyclopedia.com/social-sciences-and-law/sociology-and-social-reform/sociology-general-terms-and-concepts/command-and-control-systems> (accessed 12.05.2020).
4. *Sovremennye nauchnye podkhody v menedzhmente (protssessnyy, sistemnyy, situatsionnyy)* [Modern scientific approaches in management (process, system, situational)]. Available at: <https://scienceforum.ru/2018/article/2018004430> (accessed 20.05.2020). [In Russian]
5. Repin V. V., Eliferov V. G. *Protssessnyy podkhod k upravleniyu. Modelirovanie biznes-protssessov* [Process approach to management. Business process modeling]. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2013, 544 p. [In Russian]
6. *Etapy razvitiya protssesnogo podkhoda k upravleniyu organizatsiy, metodologiy opisaniya protssessov i ikh osnovopolozhniki* [Stages of development of the process approach to organization management, methodology of process description and their founders]. Available at: <https://infopedia.su/4x10dc.html> (accessed 29.07.2018). [In Russian]
7. Evdokimova E. N. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami* [Managing economic systems]. 2011, no. 4 (28), pp. 117–124. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16335749> (accessed 11.05.2020). [In Russian]
8. Kozlov S. V., Kubankov A. N. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2018, no. 5 (156), pp. 103–110. [In Russian]
9. Prigozhin A. I. *Metody razvitiya organizatsiy* [Methods of organization development]. Moscow: MTsFER, 2003, 864 p. [In Russian]
10. Kozlov S. V., Kubankov A. N. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) (Saint-Petersburg, 26–30 Nov. 2018)*. Saint-Petersburg, 2018. DOI 10.1109/WECONF.2018.8604445.
11. Zatsarinnyy A. A. et al. *Informatsionnoe prostranstvo tsifrovoy ekonomiki Rossii. Kontseptual'nye osnovy i problema formirovaniya* [Information space of the digital economy of Russia. Conceptual foundations and problems of formation]. Moscow: Izd-vo OOO «NIPKTs Voskhod-A», 2018, 236 p. [In Russian]
12. Kozlov S. V., Kubankov A. N. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High-tech technologies in space research of the Earth]. 2020, vol. 12, no. 1, pp. 23–31. [In Russian]
13. Grishko A. K., Lysenko A. V., Moiseev S. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 40–45. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5. [In Russian]
14. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4 (24), pp. 40–47. DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-4. [In Russian]
15. Diveev A. I., Kotova A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 60–68. [In Russian]
16. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 4, pp. 198. [In Russian]

Козлов Сергей Витальевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
руководитель отделения
«Информационные, управляющие
и телекоммуникационные системы»,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2)
E-mail: sv_kozlov@mail.ru

Kozlov Sergey Vital'evich

candidate of technical sciences,
leading researcher,
head of the department "Information, management
and telecommunications systems",
Federal research center
"Computer Science and Management"
of the Russian Academy of Sciences
(building 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Козлов, С. В. Процессные аспекты повышения качества создания интеллектуальных интегрированных систем управления / С. В. Козлов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 22–30. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-3.

В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, **Е. Н. Шевченко****О МЕТОДЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАТОРА ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ
В ЗАДАЧАХ ОБОСНОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**V. A. Ostreykovsky, S. A. Lysenkova, **E. N. Shevchenko****ON THE APPROACH TO APPLYING THE INTERNAL TIME OPERATOR
IN THE PROBLEMS OF JUSTIFICATION OF THE LONGEVITY
OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS**

Аннотация. Актуальность и цели. Вполне возможно, что одной из важных причин большого числа аварий и катастроф является неполный учет при проектировании структурно и функционально сложных систем (СФСС) условий их жизни и в том числе недостатками в расчетах долговечности с учетом неустойчивости и необратимости процессов, протекающих в оборудовании динамических систем. При этом особого внимания заслуживают вопросы одновременного учета существования разнообразных факторов конструктивного и эксплуатационного характера в условиях асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее». Без знания влияния комплекса факторов внешней среды и их разнообразия невозможно с требуемой точностью предсказывать будущее поведение сложной системы и тем более без знания ее прошлого и значений начальных условий. Неустойчивость и необратимость процессов приводят к разрушению траектории поведения оборудования СФСС и, следовательно, к возможному появлению многообразия структурированных коллективных состояний. А это грозит появлением отказов, аварий и катастроф оборудования сложных комплексов. Исследования неустойчивостей и необратимых процессов в сложных системах привели к образованию стройной теории использования понятия второго (внутреннего) времени, как на микроскопическом, так и на макроскопическом уровнях описания СФСС. Так как из-за случайного поведения траекторий оборудования динамических систем внутреннее время существенно отличается от астрономического времени, оно является оператором, соответствующим величинам в квантовой механике. И вследствие этого оно приводит к глубоким изменениям на функциональном уровне пространственно-временного континуума. Сильно неустойчивые системы с большим числом возможных необратимых процессов являются источником когерентности явлений техногенной безопасности. Если в равновесии или вблизи него состояние оборудования СФСС по крайней мере в течение достаточно долгого периода времени полностью опре-

Abstract. Background. It is possible that one of the important reasons for a large number of accidents and disasters is the incomplete consideration of their living conditions when designing structurally and functionally complex systems (SSSS), including shortcomings in the calculation of durability, taking into account the instability and irreversibility of processes in the equipment of dynamic systems. At the same time, special attention is paid to the issues of simultaneous consideration of the existence of various factors of a constructive and operational nature in the conditions of time asymmetry in the past-present-future modes. Without knowledge of the influence of a complex of environmental factors and their diversity, it is impossible to predict the future behavior of a complex system with the required accuracy, and even more so without knowledge of its past and the values of the initial conditions. The instability and irreversibility of the processes lead to the destruction of the trajectory of behavior of the SPSS equipment and, consequently, to the possible emergence of a variety of structured collective states. And this threatens the appearance of failures, accidents and catastrophes of equipment of complex complexes. Investigations of instabilities and irreversible processes in complex systems have led to the formation of a coherent theory of using the concept of second (internal) time, both at the microscopic and macroscopic levels of the description of SPSS. Since, due to the random behavior of the trajectories of the equipment of dynamic systems, the internal time differs significantly from astronomical time, it is an operator corresponding to quantities in quantum mechanics. And as a consequence of this, it leads to profound changes at the functional level of the space-time continuum. Strongly unstable systems with a large number of possible irreversible processes are a source of coherence of technological safety phenomena. If, at or near equilibrium, the state of the SPSS equipment, at least for a sufficiently long period of time, is completely determined by boundary conditions, then far from equilibrium, many dissipative structures. That is why in the last three decades of the XX and the beginning of the XXI century, the concepts of deterministic chaos

деляется краевыми условиями, то вдали от равновесия возможно появление множества диссипативных структур. Именно поэтому в последние три десятилетия XX и начале XXI в. в качестве обобщенного параметра СФСС используются понятия детерминистического хаоса и аттрактора. В силу сказанного целью данной статьи является анализ структуры и содержания концепции оператора внутреннего времени в теории долговечности сложных динамических систем. *Материалы и методы.* Концептуальной основой методологии в статье является закон возрастания энтропии и возникновение на его базе асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее». При этом анализируется новое понятие «внутреннее время», характеризующее необратимые процессы в неустойчивых динамических системах. Такой подход позволил получить аналитические выражения показателей долговечности на базе новой структуры пространства-времени: непротиворечивые средние значения «возраста» систем. *Результаты.* Сформулирована и раскрыта концепция применения понятия «внутреннее время» в теории долговечности структурно и функционально сложных систем, в том числе и специального назначения.

Ключевые слова: операторы микроскопической энтропии, Лиувилля и внутреннего времени, долговечность.

and attractor are used as a generalized parameter of the SSSS. In view of the foregoing, the purpose of this article is to analyze the structure and content of the concept of the operator of internal time in the theory of the durability of complex dynamic systems. *Materials and methods.* The conceptual basis of the methodology in the article is the law of increasing entropy and the emergence on its basis of the asymmetry of time in the modes «past-present-future.» At the same time, the new concept of “internal time”, which characterizes irreversible processes in unstable dynamic systems, is analyzed. This approach made it possible to obtain analytical expressions of durability indicators based on the new space – time structure: consistent average values of the “age” of systems. *Results.* The concept of the application of the concept of “internal time” in the theory of the durability of structurally and functionally complex systems, including for special purposes, is formulated and disclosed.

Keywords: operators of microscopic entropy, Liouville and internal time, durability.

Физико-математическое обоснование концепции оператора внутреннего времени

Требуется понимание того, как удастся включить необратимость в динамическое описание систем.

Функции Ляпунова вида (1)–(3) сдвигают оператор микроскопической энтропии M , зависящий от динамики системы

$$\Omega = \int \rho(t) M \rho(t) dpdq \geq 0 ; \tag{1}$$

$$\Omega = tr \rho^+ M \rho(t) \geq 0 ; \tag{2}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} \leq 0, \tag{3}$$

где p и q – соответственно импульсы и координаты; ρ – плотность вероятности в фазовом пространстве плотности $\rho(p_1, \dots, p_s, q_1, \dots, q_s)$.

Линейный оператор Лиувилля L

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L \rho, \tag{4}$$

$$L = -i \frac{\partial H}{\partial p} \frac{\partial}{\partial q} + i \frac{\partial H}{\partial q} \frac{\partial}{\partial p}, \tag{5}$$

$$\rho(t) = e^{-iLt} \rho(0), \tag{6}$$

где H – гамильтониан.

Оператор Лиувилля действует на матрицу и, следовательно, принадлежит к числу операторов.

Оператор M также является супероператором, так как тоже действует на матрицу плотности ρ .

Но оператор M принципиально отличается от оператора L из-за различия между чистыми и смешанными состояниями. Оператор L , действуя на ρ , соответствует чистому состоянию и оставляет систему в чистом состоянии. А оператор M не сохраняет различия между чистыми и смешанными состояниями.

Как разобраться с физическим смыслом соответствующих понятий? Для этого: 1) сначала необходимо установить связь между существованием функций Ляпунова вида (1)–(3) и больцмановским подходом, а затем 2) рассмотреть некоторые приложения с помощью включения непротиворечивым способом необратимости в динамическое описание систем.

Время – это не параметр или метка, а оператор, тесно связанный с оператором микроскопической энтропии и функциями Ляпунова

Не вызывает сомнений утверждение: для устойчивых систем небольшое изменение точности начальных условий не имеет существенного значения. В то же время неустойчивая система даже при незначительном изменении начальных условий и флуктуаций внешних и внутренних факторов имеет большие значения: траектории поведения систем становятся идеализациями из-за изменения структуры фазового пространства. Напомним, что предложенная Л. Больцманом (1844–1906) концепция необратимости постулирует: «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе стохастичности, существующей в микроскопическом масштабе» [1].

Если к этому еще добавить влияние необратимости, то больцмановский подход к описанию систем (опуская все подробности) сводится к следующему: динамика \rightarrow марковский процесс (вероятности) \rightarrow энтропия.

Обратимся сначала к описанию оператора микроскопической энтропии M через оператора Лиувилля L .

Переход от методов классической механики к операторному языку означает, что классическая механика перестает заниматься изучением траекторий и сосредотачивает все внимание на исследовании эволюции во времени функций распределения. И далее задолго до достижений в исследовании асимметрии времени Нобелевского лауреата И. Р. Пригожина [2–4] в начале XX в. А. М. Ляпунов (1906 г.) [5, 6] предложил для решения задач неравновесной термодинамики ввести функции изменчивости временной симметрии, получившие позднее название «функции Ляпунова». В работах [2–4] было доказано, что с величиной микроскопической энтропии M существуют дополнительные свойства, не включаемые в динамическое описание функционала Ляпунова, зависящего от координат и импульсов (1)–(3).

Однако если рассмотреть величину M как оператор микроскопической энтропии, не коммутирующий с оператором Лиувилля, то коммутатор

$$-i(LM - ML) = D \leq 0 \quad (7)$$

задает производство микроскопической энтропии. Такой подход приводит к новой форме дополненности между динамическим и термодинамическим описаниями, так как общих собственных функций у операторов L и M не существует. Другими словами, приходится решать дилемму, а именно: 1) либо исследовать собственные функции оператора L для определения динамики системы, 2) либо анализировать собственные функции оператора M . Из этого следует, что, по сути, необходимы дополнительные свойства, не включаемые в динамическое описание. Для этого необходимы свойства дополненности того или иного типа стохастичности движения. Поэтому была предложена более «тонкая» классификация структурно и функционально сложных систем на «внутренне случайные» и «внутренне необратимые». Внутренне случайные системы должны обладать возможностью описания повышенной сложности, т.е., например, допускать отображение на цепи Маркова. Внутренне необратимые системы должны иметь отображение, которое приводит к внутреннему различию времени между «прошлым» и «будущим»

И, как следствие, для описания динамики связи между операторами M и L вводится новый тип времени, оператор «внутреннего» времени T .

В работах [2, 4] также строго аналитически доказано, что необходимыми и достаточными условиями для перехода от оператора M к оператору внутреннего времени T являются следующие: 1) существование соотношений теоремы Пуанкаре – Мисры [2] и 2) наличие К-потоков (А. Н. Кол-

могорова, В. И. Арнольда и Ю. К. Мозера [7–9]), оператору Лиувилля L можно сопоставить такой сопряженный оператор T , что их коммутатор (8) равен константе

$$-i[L, T] = -i(LT - TL) = 1, \tag{8}$$

где 1 – единичный оператор. Классификация динамических систем основана на спектральных свойствах оператора Лиувилля, в котором оператору L соответствует число λ . Если из каких-то предположений известен оператор L , то возможно отыскать оператор T , который в том же представлении определяется производной $i(\partial/\partial\lambda)$. Это означает, что сопряженный оператор T соответствует «времени» в том смысле, что представление

$$L \rightarrow i \frac{\partial}{\partial t}, T \rightarrow t, \tag{9}$$

удовлетворяет коммутационному уравнению (8).

Выражение (8) позволяет получить соотношение для среднего внутреннего времени. Средние значения $\langle T \rangle$ и $\langle T^2 \rangle$ определяются с помощью билинейных форм

$$\langle T \rangle = \text{tr} \rho^T, \langle T^2 \rangle = \text{tr} \rho^T T^2 \rho. \tag{10}$$

И тогда «обычное» время как динамический параметр есть новое соотношение неопределенности с оператором Лиувилля:

$$\frac{d}{dt} \langle T \rangle = \frac{d}{dt} \text{tr} \left[(e^{-iLt} \rho)^T T e^{-iLt} \rho \right] = i \text{tr} \left[\rho^T e^{iLt} (LT - TL) e^{-iLt} \rho \right] = \text{tr} \rho^T \rho = \text{const}. \tag{11}$$

Если найти подходящую нормировку константе правой части (10), равной единице, то

$$dt = dT, \tag{12}$$

т.е. в этом простейшем случае внутреннее время T совпадает с астрономическим временем t . Здесь необходимо подчеркнуть, что принципиально внутреннее время совершенно отличается от времени, нумеруемого в классической или квантовой механике траектории или волновых функций, это следует из нового соотношения неопределенности с оператором Лиувилля (11).

Совпадение текущего времени t и среднего внутреннего $\langle T \rangle$ возможно только в том случае, когда собственные значения оператора T – то самое время, которое считывается с циферблата обычных часов:

$$T\rho(x, v, t) = t\rho(x, v, t), \tag{13}$$

где x – точка фазового пространства X ; v – функция скорости изменения x в X во времени t .

Во всех остальных случаях из выражений (8)–(12) следуют важные выводы:

- 1) макроскопическое время есть среднее от оператора внутреннего времени системы;
- 2) «возраст» системы зависит от самого распределения системы в фазовом пространстве и не является внешним параметром;
- 3) «возраст» системы является средним значением от «индивидуальных» времен ансамбля.

После сделанных выводов можно пойти еще дальше.

Если выражения (7) и (8) справедливы, то вместо (8) можно, как это сделано в работах [2–4], для перехода к вероятностному описанию сильно неустойчивых систем, использовать следующее соотношение между унитарным оператором U_t и оператором T :

$$U_t^T T U_t = T \cdot t \cdot 1, \tag{14}$$

где

$$T\chi_n = n\chi_n, \tag{15}$$

χ_n – собственная функция оператора T , соответствующая «возрасту» n .

Для количественного описания значений показателей долговечности таких, как ресурс, срок службы и их остаточные значения, в данный момент времени применения по назначению объектов СФСС необходимо получить аналитические зависимости показателей долговечности от функции распределения состояний объектов ρ и значений оператора внутреннего времени T . С этой целью рассмотрим полную систему собственных функций оператора T выражения (15).

Известно, что любая функция распределения состояний системы ρ может иметь разложение по собственным функциям $\{1, Y_n\}$

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n. \quad (16)$$

Аналогичным образом можно получить и полную систему собственных функций оператора T по всем возможным конечным произведениям функций χ_n . Если известна точная локализация системы, то функция ρ имеет вид δ -функции:

$$\rho = \delta_{m_0}(x, y) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0) = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n(x_0, y_0)Y_n(x, y), \quad (17)$$

где x и y оси координат.

Тогда можно утверждать:

- 1) в выражение (17) входят все «возрасты» системы с равными весами;
- 2) существует новая дополнительность между описанием системы на языке точек в фазовом пространстве и «разбиений», которые соответствуют различным внутренним «возрастам» системы;
- 3) внутренний возраст свидетельствует о новом нелокальном описании систем.

Приняв еще два предположения: 1) если функция распределения ρ имеет нулевой возраст при $\chi = \chi_0$ и 2) если по сравнению с равномерным равновесным распределением возможен избыток $\bar{\rho}$, равный

$$\bar{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n, \quad (18)$$

то каждому состоянию системы ρ возможно сопоставить средний возраст $\langle T \rangle_\rho$, равный

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \bar{\rho}, T \bar{\rho} \rangle}{\langle \bar{\rho}, \bar{\rho} \rangle}. \quad (19)$$

Учитывая ортонормированность функции Y_n и уравнение (17), можно формулу (19) преобразовать к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \quad (20)$$

Тогда в соответствии с формулой (14) получаем чрезвычайно важное выражение для среднего возраста состояния системы ρ :

$$\langle T_{\rho_t} \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t, \quad (21)$$

а именно: средний возраст состояния системы изменяется адекватно с внутренним временем или с обычным внешним временем. Более того, если

$$\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle = \langle T \rangle^2, \quad (22)$$

то

$$d\langle \delta T^2 \rangle = 0, \quad (23)$$

т.е. дисперсия внутреннего времени постоянна.

Отсюда появляется возможность сформулировать важные следствия.

Следствие 1. Феномен «внутреннее время» функционирования СФСС любого сложного объекта принудительно не похож на внешнее время.

Следствие 2. Возраст системы зависит не от срока службы какой-либо подсистемы или группы ее элементов, хотя и кажущихся наиболее важными, определяющими систему, а равен средней обобщенной оценке, относящейся ко всем частям системы.

Это противоречит принятой точке зрения в теории надежности и вероятности о «слабом звене».

Следствие 3. Неустойчивость процессов, протекающих в системе, является одним из «главных факторов появления внутреннего времени» и приводит к следующему источнику не локальности, но уже в классической механике.

Следствие 4. Суть следствия 3 приводит к возможности построения преобразования Λ , которое в свою очередь позволяет нарушить симметрию времени, т.е. осуществить переход от классической механики к термодинамике в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее».

Обобщенная схема последовательности оценки и анализа описания СФСС на макроскопическом уровне в теории долговечности

Использование метода Л. Больцмана

Подход, описанный выше в п. 2, очень близок к концепции необратимости Л. Больцмана, приведенной в работе [1]: «Необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе». Если опустить многие подробности, то схему использования подхода Л. Больцмана для целей создания методики анализа и оценки показателей долговечности СФСС можно свести к следующей последовательности (рис. 1).



Рис. 1. Последовательность расчетов показателей долговечности при использовании кинетических уравнений Л. Больцмана

В последние годы XX в. подход Л. Больцмана получил распространение через применение уравнений для плотных сред. Однако такие уравнения не допускают функцию Ляпунова, что приводит к утрате связи со вторым началом термодинамики.

Неунитарные преобразования Λ и их роль в описании динамики систем с нарушенной симметрией времени

Следующим шагом в получении искомой методики расчета показателей долговечности явилось использование не унитарных преобразований Λ . С этой целью рассмотрим «связь между существованием оператора микроскопической энтропии M и теорией преобразования с оператором Λ ».

Пусть оператор M и функция Ляпунова Ω имеют следующее соотношение:

$$\Omega = \text{tr}^+ M \rho \geq 0, \tag{24}$$

в котором (24) задает функцию Ляпунова, а оператор M зависит от «динамики». В то же самое время он может быть представлен в виде произведения оператора T и эрмитово сопряженного оператора T^T , так как T – «квадратный корень» из оператора M :

$$M = T^T T \text{ и } \Lambda^{-1} = T. \tag{25}$$

Подставляя (27) в (26), получим

$$\Omega = \text{tr} \rho^+ \tilde{\rho}, \quad (26)$$

где $\tilde{\rho}$ образ плотности при преобразовании

$$\tilde{\rho} = \Lambda^{-1} \rho. \quad (27)$$

Следовательно, можно сделать выводы:

1) если (26) – функция Ляпунова, то все выпуклые функционалы от $\tilde{\rho}$

$$\Omega = \text{tr} \tilde{\rho} \ln \tilde{\rho} \quad (28)$$

также функции Ляпунова;

2) функции Ляпунова вида (26) могут существовать только в новом представлении, получаемом из (24) с помощью преобразования (27);

3) состояние $\tilde{\rho}$, которое приводит к значению $\Omega = \min$, является аттрактором для любых остальных состояний;

4) таким образом, существует тесная связь между существованием оператора энтропии M с теорией преобразования оператора Λ .

Кроме того, важно рассмотреть свойства полученного преобразования, задаваемого соотношениями (24)–(26).

1. Уравнения движения в новом представлении (24)–(26) с учетом (27) имеют вид

$$i \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} = \Phi \tilde{\rho}, \quad (29)$$

где

$$\Phi = \Lambda^{-1} L \Lambda. \quad (30)$$

И очень важное следствие из выражений (29)–(30): новое преобразование, позволяющее включать необратимость через функции Ляпунова, намного шире простой замены координат, выражаемой унитарным преобразованием. В главе 8 [2] доказано, что разность между Φ и эрмитово сопряженным оператором Φ^T не равна тождественно нулю:

$$i(\Phi - \Phi^T) \geq 0, \quad (31)$$

т.е. новый оператор движения (29), входящий в преобразование Лиувилля (27) не должен быть эрмитовым, как оператор Лиувилля L , и возникает необходимость выхода за пределы обычного класса унитарных преобразований. Опуская промежуточные рассуждения, можно получить следующие соотношения:

$$[\Lambda^{-1}(-L)]^T = \Lambda(L), \Lambda^{-1}(L) = \Lambda^T(L). \quad (32)$$

Если оператор преобразования Λ не зависит от оператора Лиувилля, то он является унитарным преобразованием.

2. Класс уравнений движения с не унитарным законом преобразования.

Известно [2, с. 161–165], для того чтобы перейти от динамического описания поведения систем к термодинамическому, требуется прибегать к новому закону преобразования (32). Такое преобразование носит название унитарное *-преобразование

$$\Lambda^*(L) = \Lambda^T(-L), \quad (33)$$

(* означает инверсию $L \rightarrow -L$). Используя эрмитовость оператора L и соотношения (32)–(33), получаем

$$\Phi^* = \Phi^T(-L) = \Phi(L) \quad (34)$$

или

$$(i\Phi)^* = i\Phi. \quad (35)$$

Таким образом, оператор движения Φ является *-эрмитовым и должен быть либо эрмитовым и четным относительно инверсии оператора L , либо антиэрмитовым и нечетным. Следовательно, в общем случае *-эрмитов оператор имеет вид

$$i\Phi = (i\Phi)_{\text{четн.}} + (i\Phi)_{\text{нечетн.}} \quad (36)$$

Условие диссипативности (31), выражающее существование функции Ляпунова Ω , принимает вид

$$(i\Phi)_{\text{четн.}} \geq 0, \quad (37)$$

в соответствии с которым четная часть порождает «производство энтропии».

Исходя из вышеизложенного, получена новая форма микроскопического уравнения, которая в явном виде – часть, соответствующая функции Ляпунова. Другими словами, уравнения (36)–(37) содержат обратимую и необратимую части и, следовательно, макроскопическое и термодинамическое различие между обратимыми и необратимыми процессами включено в микроскопическое описание.

Физический смысл уравнений (36)–(37) таков, четный член включает в себя все процессы, дающие положительное приращение функции Ляпунова и сдвигающие систему к состоянию равновесия (рассеяние, рождение, затухание и другие процессы). И вообще, приведенные в п. 3 соотношения объединяют динамику и термодинамику и приводят к существованию динамики с характерной нарушенной « $L-t$ » симметрией. Тогда схема для последовательности анализа этого фундаментального факта может быть представлена следующим образом (рис. 2).



Рис. 2. Последовательность оценки и анализа при описании состояния сложных систем с неунитарным законом преобразования

Заключение

1. Математически строго доказано, что если для систем, являющихся внутренне случайными и внутренне необратимыми, выполняются условия вывода 11, то: 1) макроскопическое время СФСС равно среднему значению от оператора внутреннего времени системы; 2) «возраст» системы зависит от самого распределения системы в фазовом пространстве и не является внешним параметром; 3) «возраст» системы является средним значением от «индивидуальных» времен ансамбля.

2. В теории эволюции внутреннего времени систем для перехода к вероятностному описанию предлагается использовать следующее соотношение между унитарным оператором U_t (см. вывод 7) и оператором T вида $U_t^T T U_t = T + t \cdot I$, где $T\chi = n\chi_n$, и χ_n – собственная функция оператора T , соответствующая «возрасту» системы n .

3. Однако для количественного описания значений показателей долговечности СФСС необходимо знание аналитических зависимостей состояния системы ρ от значения оператора внутреннего времени T , т.е. знание полной системы собственных функций оператора T по всем возможным конечным произведениям функций χ_n . Доказано, что если это становится возможным, тогда функция ρ имеет вид δ -функции (29). Это позволяет утверждать следующее: 1) в выражении для δ -функции описания ρ входят все «возрасты» системы с равными весами; 2) существует новая дополненность между описанием системы на языке точек в фазовом пространстве и «разбиениями», которые соответствуют различным внутренним «возрастам» системы; 3) «внутренний возраст» свидетельствует о новом нелокальном описании системы. Если при этом принять два предположения:

а) функция распределения состояния системы ρ имеет нулевой возраст при $\chi = \chi_0$ и б) по сравнению с равномерным и равновесным распределением возможны избытки $\bar{\rho} = \rho - 1$, то каждому состоянию $\bar{\rho}$ возможно сопоставить средний возраст $\langle T \rangle_{\rho} = \langle n \rangle$.

4. В конечном итоге получаем выражение для «среднего возраста» состояния системы ρ $\langle T_{\rho_i} \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t$. Это свидетельствует о том, что средний возраст состояния системы изменяется адекватно внутреннему времени или с обычным внешним временем t . И даже более того, если $\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle = \langle T \rangle^2$, то $d\langle \delta T^2 \rangle = 0$, т.е. дисперсия внутреннего времени постоянна. Проанализировав выводы 2–4, появляется возможность сформулировать вывод 5 в виде четырех следствий, которые звучат как постулаты содержания всей статьи.

5. Следствие 1. Феномен «внутреннее время» любого сложного объекта принципиально отличается от времени функционирования СФСС.

Следствие 2. Возраст системы зависит не от срока службы (ресурса) какой-либо ее подсистемы или группы элементов, хотя и кажущихся наиболее важными, определяющими систему, а равен средней обобщенной оценке, относящейся ко всем частям системы. Это противоречит часто принимаемой точке зрения в теориях надежности и безопасности, положениях о «слабом звене», на которое должно быть обращено главное внимание при оценке долговечности.

Следствие 3. Неустойчивость процессов (особенно сильная) является одним из главных факторов появления «внутреннего времени» как источника нелокальности.

Следствие 4. Суть следствия 3 состоим в том, что оно приводит к возможности построения нарушающего симметрию времени преобразования Λ , и осуществляется переход от классической механики к термодинамике в модусах «прошлое–настоящее–будущее».

6. Результаты, описанные в выводах 1–5, очень близки к концепции необратимости Л. Больцмана: «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе». Последовательность расчетов показателей долговечности систем при использовании кинетических уравнений Л. Больцмана выглядит следующим образом: динамика \rightarrow Марковские процессы \rightarrow энтропия через H -функцию Больцмана. Однако оказалось, что полученные таким образом уравнения не допускают функции Ляпунова, что приводит к утере связи со вторым началом термодинамики.

Поэтому следующим шагом в получении искомой методологии расчета показателей долговечности явился подход с использованием преобразований Λ .

7. В конце XX в. сложился принципиально новый подход к оценке и анализу показателей долговечности сложных систем с учетом асимметрии времени и неунитарных преобразований Λ .

Математически строго получен оператор движения Φ вида: $i\Phi = (i\overset{\text{четн.}}{\Phi}) + (i\overset{\text{нечетн.}}{\Phi})$, в котором содержатся обратимые и необратимые части. Условие диссипативности, выражающее существование функции Ляпунова $(i\overset{\text{четн.}}{\Phi}) \geq 0$, порождает «производство энтропии», и, следовательно, макроскопическое термодинамическое различие между обратимыми и необратимыми процессами включено в микроскопическое описание. Физический смысл уравнений (36) и (37): четный член включает в себя все процессы, дающие вклад в положительное приращение функции Ляпунова и сдвигающее систему к состоянию равновесия.

В целом данный подход объединяет динамику и термодинамику и приводит к существованию динамики с характерной, нарушенной « $L-t$ » симметрией. И тогда результат этого фундаментального факта позволяет скоординировать различные виды уравнений описания состояния и показателей долговечности структурно и функционально сложных систем.

Сама методика (последовательность) описания оценки и анализа состояния таких систем будет детально рассмотрена авторами статьи позднее.

8. Для решения задач оценки асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее» в теории долговечности СФСС необходим комплексный подход с учетом операторов микроскопической энтропии M , преобразования Λ , внутреннего времени T , функций Ляпунова, методов и моделей современного функционального анализа и теории случайных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №18-07-00391, №18-47-860007).

Библиографический список

1. *Больцман, Л.* Лекции по теории газов : пер. с нем. / Л. Больцман. – Москва, 1956. – 554 с.
2. *Пригожин, И. Р.* От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. / И. Р. Пригожин ; под ред. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 304 с.
3. *Пригожин, И. Р.* Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы / И. Р. Пригожин. – Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. – 208 с.
4. *Пригожин, И. Р.* Время. Хаос. Квант: к решению парадокса времени : пер. с англ. / И. Р. Пригожин, И. Стенгерс ; под ред. В. И. Аршинова. – Москва : Книжный дом «Либроком», 2009. – 240 с.
5. *Ляпунов, А. М.* Собрание сочинений / А. М. Ляпунов. – Москва – Ленинград, 1956. – Т. 2. – 472 с.
6. *Ляпунов, А. М.* Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. – Москва : Изд. АН СССР, 1950. – 470 с.
7. *Колмогоров, А. Н.* Теория вероятностей и ее применения / А. Н. Колмогоров // Математика и естествознание в СССР. – Москва ; Ленинград : ГОНТИ, 1938. – С. 51–61.
8. *Арнольд, В. И.* Математические методы классической механики / В. И. Арнольд. – Москва : Едиториал УРСС, 2017. – 416 с.
9. *Мозер, Ю. К.* Регулярная и стохастическая динамика / Ю. К. Мозер. – Москва : Мир, 1984. – 536 с.
10. *Острейковский, В. А.* Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций / В. А. Острейковский. – Москва : Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
11. *Антонов, А. В.* Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС) / А. В. Антонов, В. А. Острейковский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 536 с.
12. *Острейковский, В. А.* Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // В книге: Итоги науки. Выпуск 37. Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – Москва : РАН, 2018. – С. 69–111.

References

1. Boltzman L. *Leksii po teorii gazov: per. s nem.* [Lectures on the theory of gases: transl. from German]. Moscow, 1956, 554 p. [In Russian]
2. Prigozhin I. R. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh: per. s angl.* [From the Existing to the Emerging: Time and Complexity in the Physical Sciences: trans. from English]. 2nd ed., suppl. Moscow: Editorial URSS, 2002, 304 p. [In Russian]
3. Prigozhin I. R. *Konets opredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody* [The end of certainty. Time, chaos, and the new laws of nature]. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, 1999, 208 p. [In Russian]
4. Prigozhin I. R., Stengers I. *Vremya. Khaos. Kvant: k resheniyu paradoksa vremeni: per. s angl.* [Time. Chaos. Quantum: to the solution of the time paradox : transl. from English]. Moscow: Knizhnyy dom «Librokom», 2009, 240 p. [In Russian]
5. Lyapunov A. M. *Sobranie sochineniy* [Collected works]. Moscow; Leningrad, 1956, vol. 2, 472 p. [In Russian]
6. Lyapunov A. M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya* [The General problem of motion stability]. Moscow: Izd. AN SSSR, 1950, 470 p. [In Russian]
7. Kolmogorov A. N. *Matematika i estestvoznaniye v SSSR* [Mathematics and Natural science in the USSR]. Moscow; Leningrad: GONTI, 1938, pp. 51–61. [In Russian]
8. Arnol'd V. I. *Matematicheskie metody klassicheskoy mekhaniki* [Mathematical methods of classical mechanics]. Moscow: Editorial URSS, 2017, 416 p. [In Russian]
9. Mozer Yu. K. *Regulyarnaya i stokhasticheskaya dinamika* [Regular and stochastic dynamics]. Moscow: Mir, 1984, 536 p. [In Russian]
10. Ostreykovskiy V. A. *Starenie i prognozirovaniye resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy* [Aging and forecasting of the service life of nuclear power plant equipment]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 288 p. [In Russian]
11. Antonov A. V., Ostreykovskiy V. A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoy AES)* [Resource and service life of the equipment of nuclear power units (on the example of the power units of the Smolensk NPP)]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 536 p. [In Russian]
12. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Itogi nauki. Vypusk 37. Izbrannyye trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma po fundamental'nyim i prikladnym problemam nauki* [Results of science. Issue 37. Selected proceedings of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science]. Moscow: RAN, 2018, pp. 69–111. [In Russian]

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@surgu.ru

Лысенкова Светлана Александровна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: lsa1108@mail.ru

Шевченко Елена Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Lysenkova Svetlana Aleksandrovna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Shevchenko Elena Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Образец цитирования:

Острейковский, В. А. О методе применения оператора внутреннего времени в задачах обоснования долговечности сложных динамических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 31–41. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-4.

И. А. Кубасов

УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

I. A. Kubasov

MANAGING THE SAFETY OF POTENTIALLY HAZARDOUS OBJECTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследованы теоретические аспекты управления безопасностью потенциально опасных объектов с целью выработки единого методологического подхода к категорированию объектов по степени защищенности. *Материалы и методы.* Предложено категорировать потенциально опасные объекты, используя шесть категорий по степени потенциальной опасности и шесть категорий по степени защищенности. Определен основной показатель эффективности управления безопасностью объекта как интегральный показатель категорирования объекта по степени защищенности. Предложен новый методологический подход к категорированию потенциально опасных объектов по степени их защищенности, основанный на учете трех основных факторов: уровня охраны объекта; уровня собственной (технологической) защищенности объекта и уровня защиты информации объекта. *Результаты.* Обосновано условие обеспечения безопасности объекта – категория объекта по степени потенциальной опасности должна совпадать с категорией данного объекта по степени защищенности. Выработаны практические рекомендации по определению первоочередности и направлений совершенствования системы обеспечения безопасности потенциально опасного объекта для выполнения условия обеспечения безопасности объекта. *Выводы.* Разработанная система категорирования позволяет обоснованно дифференцировать требования к уровню безопасности каждой категории объектов, а также оценить соответствие системы обеспечения безопасности объекта требуемой категории по степени защищенности объекта, равной категории по степени потенциальной опасности объекта.

Ключевые слова: потенциально опасный объект; категорирование; степень защищенности; управление безопасностью; система обеспечения безопасности; охрана объекта; защита информации.

Abstract. *Background.* Theoretical aspects of safety management of potentially hazardous objects were investigated in order to develop a unified methodological approach to categorizing objects by degree of security. *Materials and methods.* It is proposed to categorize potentially dangerous objects using six categories by the degree of potential danger and six categories by the degree of protection. Main indicator of object safety management efficiency is defined as integral indicator of object classification by degree of security. A new methodological approach to categorizing potentially hazardous objects by the degree of their security is proposed, based on three main factors: the level of protection of the object; level of own (technological) security of the object and level of information protection of the object. *Results.* The condition for ensuring the safety of the object is justified – the category of the object by the degree of potential danger should coincide with the category of this object by the degree of protection. Practical recommendations have been developed to determine priorities and directions for improving the security system of a potentially dangerous facility in order to fulfill the condition for ensuring the safety of the facility. *Conclusions.* The developed categorization system makes it possible to reasonably differentiate the requirements for the safety level of each category of objects, as well as evaluate the compliance of the object security system with the required category by the degree of security of the object, equal to the category by the degree of potential danger of the object.

Keywords: potentially dangerous object; categorization; security degree; management of safety; security management system; protection of an object; information security.

Введение

Хозяйственная деятельность современного человека, связанная с применением на объектах сложных и опасных технологий, может приводить к возникновению различных аварий и чрезвычайных ситуаций. Поэтому вопросам обеспечения безопасности потенциально опасных объектов

должно уделяться повышенное внимание, в том числе и в силу возможных попыток совершения террористических актов на таких объектах [1–4].

Весьма актуальным является применение единого методологического подхода к обеспечению безопасности потенциально опасных объектов и, в частности, к организации их защиты. Такой единый подход обеспечивает категорирование (группирование по определенным признакам) объектов [5]. При этом целесообразно иметь две оценки: степень реальной угрозы возникновения источника чрезвычайной ситуации и степень предотвращения или предельного снижения негативных последствий для населения, других объектов и окружающей природной среды. Так как объект выступает источником потенциальной опасности и объектом защиты, то следует рассматривать два аспекта управления безопасностью объекта – управление степенью потенциальной опасности объекта, с одной стороны, и управление степенью его защищенности, в том числе антитеррористической защищенности, с другой стороны [5–7].

Как следует из анализа нормативных правовых документов и научных публикаций [1–3, 5, 8], при категорировании потенциально опасных объектов выбирают разное количество категорий (от 3 до 10). В данной статье предлагается свой методологический подход к категорированию потенциально опасных объектов по степени защищенности.

Выбор количества категорий объектов по степени потенциальной опасности и степени защищенности

Потенциально опасный объект – это объект, на котором расположены здания и сооружения повышенного уровня ответственности, либо объект, на котором возможно одновременное пребывание более пяти тысяч человек [3].

Также имеется иное определение потенциально опасного объекта: объект, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения источника чрезвычайной ситуации (ГОСТ Р 22.0.02-94: Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий).

Рассматривая построение системы категорирования, следует понимать, что категории потенциальной опасности и защищенности объектов, в отличие от объективных классификаций (например, периодический закон Д. И. Менделеева), являются субъективными, т.е. количество категорий, показатели и нормативные значения показателей категорирования назначаются людьми в определенной степени произвольно, исходя из конкретных потребностей и с учетом имеющихся возможностей по оценке этих показателей.

Вследствие отличий потенциально опасных объектов, величины рисков (ущербов) аварий на конкретных объектах (в результате антропогенных, техногенных и природных факторов воздействия) характеризуются значительным разбросом, что, в свою очередь, требует введения расширенного набора категорий для учета индивидуальных особенностей объектов и обеспечения требуемой точности категорирования. Поэтому с учетом принятой классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 1094 от 13.09.1996 [8] предлагается установить **шесть категорий объектов по степени потенциальной опасности**: объекты 1 и 2-й категории – объекты высокой потенциальной опасности, 3 и 4-й категории – объекты средней потенциальной опасности, 5 и 6-й категории – объекты низкой потенциальной опасности.

С учетом взаимосвязи категорий по степени потенциальной опасности и степени защищенности предлагается также выбрать **шесть категорий объектов по степени защищенности**: объекты 1 и 2-й категории – объекты высокой защищенности, 3 и 4-й категории – объекты средней защищенности, 5 и 6-й категории – объекты низкой защищенности.

Условие обеспечения безопасности объекта

Любой объект обладает разной степенью защищенности по отношению к возможности провоцирования на нем различных аварий [5, 9, 10]. Безусловно, среди всего множества предполагаемых аварий особое место занимает наиболее опасная авария, определяющая категорию по степени опасности объекта. По отношению к этой аварии категория по степени защищенности объекта должна

определяться. Категорию по степени защищенности обозначим как U_a^+ , она должна быть определена для каждой аварии из множества A_T . После этого полная характеристика защищенности объекта представляется в виде графика в координатах (D_a^+, U_a^+) , где каждой аварии из множества A_T соответствует одна точка с координатами, равными категориям по степени опасности этой аварии D_a^+ и степени по защищенности объекта по отношению к этой аварии U_a^+ .

Состояние обеспечения безопасности объекта можно сформулировать как выполнение следующего условия: категория объекта по степени потенциальной опасности должна совпадать с категорией данного объекта по степени защищенности. Графически выполнение этого условия можно представить на рис. 1.



Рис. 1. График благополучного объекта

На рис. 2 изображен график состояния безопасности объекта при перерасходе средств, направляемых на достижение требуемого уровня безопасности. В этом случае категория объекта по степени потенциальной опасности ниже категории данного объекта по степени защищенности.



Рис. 2. График безопасного объекта при перерасходе средств

На рис. 3 изображен график неблагополучного объекта, так как защищенность объекта низкая по отношению к наиболее опасным авариям и высокая – по отношению к менее опасным авариям, т.е. в этом случае категория объекта по степени потенциальной опасности выше категории данного объекта по степени защищенности.

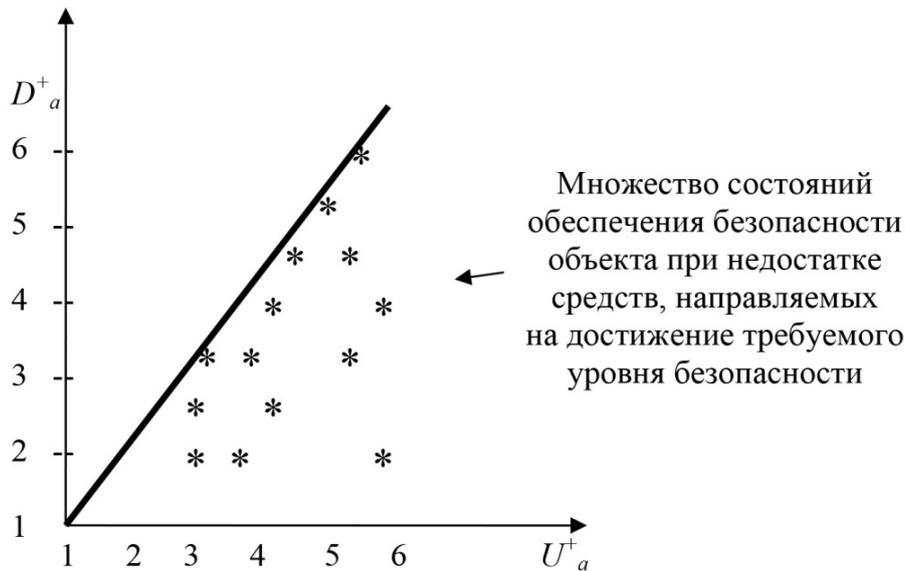


Рис. 3. График неблагополучного объекта

Пользуясь такими графиками (D_a^+ , U_a^+), с учетом исключения перерасхода и недостатка средств, направляемых на достижение требуемого уровня безопасности, можно записать *условие обеспечения безопасности объекта*:

$$D_a^+ - U_a^+ = W_0 = 0. \quad (1)$$

Величину W_0 можно принять в качестве условной оценки уровня безопасности объекта в целом, соответственно, можно рассматривать как *критерий эффективности управления безопасностью объекта*.

Теперь, имея критерий эффективности управления безопасностью потенциально опасных объектов, выберем основной (интегральный) показатель эффективности управления безопасностью, как показатель категорирования объектов по степени защищенности.

Интегральный показатель эффективности управления безопасностью потенциально опасных объектов

Если объект не охраняется, то он незащищен по отношению к любой аварии и категория его защищенности низшая:

$$U_a = 6. \quad (2)$$

Если потенциально опасный объект охраняется, то в этом случае его антитеррористическая защищенность по отношению к конкретной аварии определяется временем преодоления нарушителем системы охраны и достижения критической точки воздействия на объект с целью вызова этой аварии, а также мощностью вооружения нарушителя, например, массой специального снаряжения для воздействия на объект. Будем называть эти величины «временем доступа» и «массой снаряжения». Также полагаем, что шестой категории по степени защищенности соответствует время доступа $t_6 = 1$ с и масса снаряжения $m_6 = 0,1$ кг. Одна секунда (условно) – это время, в течение которого охранник смотрит на каждого человека в потоке людей, проходящих через турникет проходной. Сто граммов взрывчатки, нож, отвертка, гаечный ключ (все условно) – это снаряжение, с помощью которого можно устроить небольшую аварию на объекте.

В качестве основного показателя эффективности управления безопасностью потенциально опасного объекта принимаем показатель категорирования по степени защищенности, равный интегральному показателю эффективности функционирования системы обеспечения безопасности (далее – СОБ) объекта. При этом показатели «время доступа» (показатель уровня охраны), «масса снаряжения» (показатель уровня собственной защищенности) и уровня защиты информации являются частными показателями эффективности функционирования СОБ. Таким образом, определение

категории объекта по степени защищенности строим на основе учета трех факторов: уровня охраны объекта, уровня собственной (технологической) защищенности объекта и уровня защиты информации объекта.

Теперь рассмотрим рекомендации по учету указанных факторов.

Предлагается определять три уровня охраны объекта по значениям показателя эффективности функционирования системы охраны $P_{\text{охр}}$.

Если $P_{\text{охр}} \geq 0,95$, то достигается **первый уровень охраны объекта** (высокая эффективность системы).

Если $0,8 \leq P_{\text{охр}} < 0,95$, то достигается **второй уровень охраны объекта** (средняя эффективность системы).

Если $0 \leq P_{\text{охр}} < 0,8$, то достигается **третий уровень охраны объекта** (низкая эффективность системы).

Значение данного показателя зависит от конкретных условий расположения объекта, осведомленности нарушителя о системе охраны, эффективности функционирования подсистем системы охраны (систем обнаружения, распознавания и оповещения, системы контроля и управления доступом, системы сигнализации и т.п.) [11].

Собственная (технологическая) защищенность объекта оценивается по четырем уровням.

Первым уровнем собственной (технологической) защищенности обладает объект в том случае, если значительные повреждения конструкции (сооружения, технологического оборудования) объекта не приводят к его выходу из строя (высокая собственная защищенность).

Вторым уровнем собственной (технологической) защищенности обладает объект в том случае, если значительные повреждения конструкции (сооружения, технологического оборудования) объекта приводят к его частичному выходу из строя.

Третьим уровнем собственной (технологической) защищенности обладает объект в том случае, если незначительные повреждения конструкции (сооружения, технологического оборудования) объекта приводят к его частичному выходу из строя.

Четвертым уровнем собственной (технологической) защищенности обладает объект в том случае, если незначительные повреждения конструкции (сооружения, технологического оборудования) объекта приводят к его полному выходу из строя (низкая собственная защищенность).

При этом под незначительным повреждением объекта понимается повреждение менее 1 % конструкции (сооружения, количества технологического оборудования и др.) объекта.

Под значительным повреждением объекта понимается повреждение более 10 % конструкции (сооружения, количества технологического оборудования и др.) объекта.

Уровень защиты информации определяется по значениям показателя эффективности функционирования системы защиты информации $P_{\text{сзи}}$.

Если $P_{\text{сзи}} \geq 0,95$, то существующая система защиты информации объекта относится к **первому уровню** (высокая эффективность системы).

Если $0,8 \leq P_{\text{сзи}} < 0,95$, то существующая система защиты информации объекта относится ко **второму уровню** (средняя эффективность системы).

Если $0 \leq P_{\text{сзи}} < 0,8$, то система охраны объекта относится к **третьему уровню** (низкая эффективность системы).

Значение данного показателя зависит от профессиональной подготовленности органа защиты (исполнителей), применяемых средств защиты информации (программных, технических и др.), особенностей объекта защиты информации.

С учетом трех указанных факторов предлагается категорию объекта по степени защищенности определять из данных, приведенных в табл. 1–3.

Таблица 1

Категория объекта по степени защищенности при первом (верхнем) уровне защиты информации

Уровень охраны	Уровень собственной (технологической) защищенности объекта			
	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	3	4	5
3	3	4	5	6

Таблица 2

Категория объекта по степени защищенности при втором (среднем) уровне защиты информации

Уровень охраны	Уровень собственной (технологической) защищенности объекта			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
2	3	4	5	6
3	4	5	6	6

Таблица 3

Категория объекта по степени защищенности при третьем (нижнем) уровне защиты информации

Уровень охраны	Уровень собственной (технологической) защищенности объекта			
	1	2	3	4
1	3	4	5	6
2	4	5	6	6
3	5	6	6	6

Следовательно, категорию потенциально опасного объекта по степени защищенности можно определить, выполняя следующие операции:

– применяя известные методики, отдельно рассчитать значения частных показателей: уровня охраны объекта, уровня собственной (технологической) защищенности объекта и уровня защиты информации объекта;

– установить категорию объекта по степени защищенности как интегрального показателя эффективности системы обеспечения безопасности объекта, по полученным значениям частных показателей из соответствующей таблицы (1 или 2 или 3), т.е. выполнить сверстку частных показателей эффективности СОБ объекта.

Таким образом, установив текущую категорию потенциально опасного объекта по степени защищенности и сопоставив ее с категорией объекта по степени потенциальной опасности, можно обосновано принять решение о целесообразности тех или иных мероприятий по выполнению условия обеспечения безопасности объекта: категория объекта по степени потенциальной опасности должна быть равна категории объекта по степени защищенности.

Заключение

Предлагаемый методологический подход к категорированию потенциально опасных объектов по степени защищенности на основе учета трех основных факторов: уровня охраны объекта; уровня собственной (технологической) защищенности объекта и уровня защиты информации объекта (табл. 1–3) отвечает требованиям политики в сфере обеспечения безопасности объектов от террористических, техногенных и природных воздействий (аварий).

Разработанная система категорирования позволяет обоснованно дифференцировать требования к уровню безопасности каждой категории объектов, а также оценить соответствие системы обеспечения безопасности объекта требуемой категории по степени защищенности объекта, равной категории по степени потенциальной опасности объекта.

Кроме того, применение такого подхода к категорированию объектов по степени защищенности позволяет легко устанавливать приоритетность работ по совершенствованию системы обеспечения безопасности объекта и повышению степени защищенности: уровня охраны и (или) уровня собственной (технологической) защищенности объекта и (или) уровня защиты информации объекта. Так, среди объектов из одной категории по степени потенциальной опасности в первую очередь подлежит совершенствованию система обеспечения безопасности объекта, имеющего более низкую категорию по степени защищенности. При этом требуемое (или требуемые) направление совершенствования системы обеспечения безопасности объекта можно определить (исходя из наличия необходимых ресурсов) из набора возможных вариантов повышения категории по степени защищенности.

Библиографический список

1. Коршунов, С. С. Совершенствование взаимодействия надзорных органов при осуществлении контрольных мероприятий в отношении субъектов надзора, эксплуатирующих критически важные и потенциально опасные объекты / С. С. Коршунов, В. М. Егоров // Технологии гражданской безопасности. – 2016. – Т. 13, № 2 (48). – С. 16–20.
2. Боровский, А. С. Особенности идентификации предметной области «категорирование потенциально опасных объектов» в нечеткой постановке / А. С. Боровский, А. Д. Тарасов // Информационные системы и технологии. – 2010. – № 3 (59). – С. 63–71.
3. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федер. закон № 68-ФЗ (ред. от 01.04.2020) от 21.12.1994.
4. Об утверждении требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий) системы государственного материального резерва и формы паспорта безопасности этих объектов (территорий) : постановление Правительства РФ № 1053 от 17.10.2016.
5. Кубасов, И. А. Методика категорирования потенциально опасных объектов по степени защищенности с применением логарифмической шкалы / И. А. Кубасов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 121–127.
6. Дедков, В. К. Вопросы синтеза безопасности объектов защиты / В. К. Дедков, О. А. Бобр, И. А. Кубасов // Стратегическая стабильность. – 2006. – № 2 (35). – С. 45–50.
7. Дедков, В. К. Некоторые вопросы управления риском объектов защиты / В. К. Дедков, О. А. Бобр, И. А. Кубасов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2006. – Т. 2. – С. 175–178.
8. О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : постановление Правительства Российской Федерации № 1094 от 13.09.1996.
9. Северцев, Н. А. Анализ опасностей сложных технических систем / Н. А. Северцев, И. А. Кубасов, О. А. Бобр // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2006. – Т. 2. – С. 170–172.
10. Северцев, Н. А. Исследование рисков в деятельности человека / Н. А. Северцев, И. А. Кубасов, О. А. Бобр // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2006. – Т. 2. – С. 172–175.
11. Гурлев, И. В. Адаптивный подход к управлению охраной объекта / И. В. Гурлев, А. С. Овчинский, И. А. Кубасов // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2018. – № 4. – С. 37–42.

References

1. Korshunov S. S., Egorov V. M. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Civil security technologies]. 2016, vol. 13, no. 2 (48), pp. 16–20. [In Russian]
2. Borovskiy A. S., Tarasov A. D. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies]. 2010, no. 3 (59), pp. 63–71. [In Russian]
3. *O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera: feder. zakon № 68-FZ (red. ot 01.04.2020) ot 21.12.1994* [On the Protection of the Population and Territories from natural and Man-made Emergencies : Federal Law No. 68-FZ (as amended on 01.04.2020) of 21.12.1994]. [In Russian]
4. *Ob utverzhdenii trebovaniy k antiterroristicheskoy zashchishchennosti ob"ektov (territoriy) sistemy gosudarstvennogo material'nogo rezerva i formy pasporta bezopasnosti etikh ob"ektov (territoriy): postanovlenie Pravitel'stva RF № 1053 ot 17.10.2016* [On approval of the requirements for anti-terrorist protection of objects (Territories) of the State Material reserve system and the form of the safety Data sheet for these Objects (Territories) : Government of the Russian Federation Decree No. 1053 of 17.10.2016]. [In Russian]
5. Kubasov I. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2020, no. 3 (31), pp. 121–127. [In Russian]
6. Dedkov V. K., Bobr O. A., Kubasov I. A. *Strategicheskaya stabil'nost'* [Strategic stability]. 2006, no. 2 (35), pp. 45–50. [In Russian]
7. Dedkov V. K., Bobr O. A., Kubasov I. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2006, vol. 2, pp. 175–178. [In Russian]
8. *O klassifikatsii chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera: postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 1094 ot 13.09.1996* [On the Classification of Natural and Man-made Emergencies: Decree of the Government of the Russian Federation No. 1094 of 13.09.1996]. [In Russian]
9. Severtsev N. A., Kubasov I. A., Bobr O. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2006, vol. 2, pp. 170–172. [In Russian]
10. Severtsev N. A., Kubasov I. A., Bobr O. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2006, vol. 2, pp. 172–175. [In Russian]
11. Gurlev I. V., Ovchinskii A. S., Kubasov I. A. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia]. 2018, no. 4, pp. 37–42. [In Russian]

Кубасов Игорь Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационных технологий,
Академия управления МВД России
(Россия, г. Москва, ул. Зои и Александра
Космодемьянских, 8)
E-mail: igorak@list.ru

Kubasov Igor Anatolyevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information technologies,
Academy of management of the Ministry
of internal affairs of the Russian Federation
(8 Zoy and Alexander Kosmodemiansky street,
Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Кубасов, И. А. Управление безопасностью потенциально опасных объектов / И. А. Кубасов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 42–49. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-5.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 681.518.5

DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-6

В. Н. Клячкин, Д. А. Жуков

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АГРЕГИРОВАННЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ

V. N. Klyachkin, D. A. Zhukov

AUTOMATED DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE OBJECT USING THE AGGREGATED CLASSIFIERS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для обеспечения надежности технического объекта проводится его диагностика в условиях эксплуатации по результатам мониторинга показателей функционирования этого объекта. Актуальность задачи обусловлена постоянно растущими требованиями по безопасности и надежности техники. При диагностировании работоспособности технического объекта требуется оценить его состояние по заданным показателям функционирования. При этом могут использоваться методы многомерной классификации, как стандартные статистические, так и специальные методы машинного обучения. Существенными особенностями рассматриваемой задачи являются, во-первых, несбалансированность обучающей выборки: информации о показателях функционирования при неработоспособных состояниях объекта гораздо меньше, чем при работоспособных, и во-вторых, сравнительно небольшой объем выборки (как правило, сотни наблюдений, в отличие от «BigData» в десятки и сотни тысяч в обычных задачах машинного обучения). Цель исследования – разработка программного комплекса, который в автоматическом режиме, анализируя ис-

Abstract. *Background.* To ensure the reliability of the technical object, its diagnostics is carried out in operating conditions according to the results of monitoring the performance indicators of this object. The relevance of the task is due to the constantly growing requirements for the safety and reliability of technology. When diagnosing the operability of a technical object, it is required to evaluate its condition according to specified performance indicators. In this case, multidimensional classification methods can be used, both standard statistical and special machine learning methods. Significant features of the problem under consideration are, firstly, the imbalance of the training sample: information on the performance indicators for inoperative states of the object is much less than for healthy ones, and secondly, a relatively small sample size (usually hundreds of observations, unlike “BigData” «Tens and hundreds of thousands in the usual problems of machine learning). The aim of the study is to develop a software package that, automatically, analyzing the initial data on the results of the previous operation, would give an opinion on the operability of the facility and would predict its condition according to specified performance indicators. *Materials and methods.* To solve the diagnostic problem,

ходные данные о результатах предшествующей эксплуатации, давал бы заключение о работоспособности объекта и прогнозировал бы его состояние по заданным показателям функционирования. *Материалы и методы.* Для решения задачи диагностики могут быть использованы различные методы машинного обучения: наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов, композиционные методы (бэггинг и бустинг) и др. Для повышения точности диагностики могут быть применены агрегированные методы классификации, которые используют комбинацию базовых моделей, построенных на обучающей выборке. При формировании единого решения о работоспособности объекта можно использовать три варианта агрегирования результатов: по среднему значению, по медиане, а также с помощью процедуры голосования. Кроме агрегирования, качество диагностики также зависит от выбранного объема контрольной выборки и способа отбора значимых показателей. Доля контрольной выборки в общем объеме исходных данных (или количество блоков разбиения выборки при кросс-валидации) оказывает неоднозначное влияние на качество классификации: для каждого конкретного технического объекта необходимо оценивать этот фактор индивидуально. Еще один фактор, существенно влияющий на качество диагностики, – это значимость влияния рассматриваемых показателей функционирования на состояние объекта. Рассматриваются два подхода к оценке значимости показателей. *Результаты и выводы.* Разработан алгоритм и программный комплекс для диагностики технического состояния объекта с использованием агрегированных классификаторов, включающий в себя: разбиение исходных данных на контрольную и обучающую выборки, отбор значимых признаков, построение базовых и агрегированных классификаторов, поиск наилучшего по F -критерию метода, а также возможность прогнозирования состояния технического объекта. Все перечисленные функции рассчитываются в автоматизированном режиме, тем самым для осуществления диагностики технического объекта достаточно загрузить данные о его предшествующих состояниях и программный комплекс подберет оптимальные параметры для получения наиболее точного результата. В качестве объекта исследования использовалась система горячего водоснабжения в городе Ульяновск: контроль проводился по данным, снятым со счетчиков водоснабжения. Путем проведения статистических испытаний показана эффективность разработанных моделей и алгоритмов, при этом значение F -критерия на исследуемых выборках за счет применения агрегирования, выбора объема контроля и отбора значимых показателей увеличилось до 15 % относительно базовых методов.

Ключевые слова: техническая диагностика, показатели функционирования, работоспособность, агрегированные классификаторы, кросс-валидация, F -критерий, счетчик горячего водоснабжения.

various machine learning methods can be used: a naive Bayesian classifier, a support vector method, compositional methods (bagging and boosting) and others. To increase the accuracy of diagnostics, aggregated classification methods can be applied that use a combination of basic models built on a training set. When forming a unified decision on the operability of an object, you can use three options for aggregating results: by average, by median, and also by using the voting procedure. In addition to aggregation, the quality of diagnostics also depends on the selected volume of the control sample and the method of selecting significant indicators. The share of the control sample in the total volume of the source data (or the number of blocks of sample splitting during cross-validation) has an ambiguous effect on the quality of classification: for each specific technical object, it is necessary to evaluate this factor individually. Another factor that significantly affects the quality of diagnostics is the significance of the influence of the considered indicators of functioning on the state of the object. Two approaches to assessing the significance of indicators are considered. *Results and conclusions.* An algorithm and software package for diagnosing the technical condition of an object using aggregated classifiers has been developed, including: dividing the source data into control and training samples, selecting significant features, building basic and aggregated classifiers, searching for the best method according to the F -criterion, as well as the ability to predict state of the technical object. All these functions are calculated in an automated mode, thus, to carry out diagnostics of a technical object, it is enough to download data on its previous states and the software package will select the optimal parameters to obtain the most accurate result. The hot water supply system in the city of Ulyanovsk was used as the object of study: control was carried out according to data taken from water supply meters. By carrying out statistical tests, the effectiveness of the developed models and algorithms is shown, while the value of the F -criterion in the studied samples through the use of aggregation, the choice of control volume and the selection of significant indicators increased to 15 % relative to the basic methods.

Keywords: technical diagnostics, performance indicators, operability, aggregated classifiers, cross-validation, F -criterion, counter of hot water supply.

Постановка задачи

Для обеспечения надежности технического объекта проводится его диагностика в условиях эксплуатации по результатам мониторинга показателей функционирования этого объекта. Актуальность задачи обусловлена постоянно растущими требованиями по безопасности и надежности техники [1–3], а современные компьютерные технологии, в частности, используемые в настоящей работе методы машинного обучения, позволяют более точно диагностировать состояние объекта. Часто диагностика сводится к распознаванию одного из двух состояний: к разделению состояний объекта на исправные или неисправные, работоспособные или неработоспособные.

При диагностировании работоспособности технического объекта требуется оценить его состояние по заданным показателям функционирования. При этом могут использоваться методы многомерной классификации, как стандартные статистические, так и специальные методы машинного обучения, к которым относятся нейронные сети, ансамбли моделей и др. [4–6]. Существенными особенностями рассматриваемой задачи являются, во-первых, несбалансированность обучающей выборки: информации о показателях функционирования при неработоспособных состояниях объекта гораздо меньше, чем при работоспособных, и во-вторых, сравнительно небольшой объем выборки (как правило, сотни наблюдений, в отличие от «BigData» в десятки и сотни тысяч в обычных задачах машинного обучения).

Диагностика работоспособности объекта может рассматриваться как задача бинарной классификации [7–9]. Точность решения этой задачи зависит от:

- объема выборки с данными по результатам мониторинга функционирования объекта в процессе эксплуатации;
- качества этой выборки (в частности, наличия выбросов и пропущенных наблюдений);
- способа разделения выборочных данных на обучающую и контрольную части;
- метода классификации (могут быть использованы десятки существенно различающихся различных моделей классификации);
- критериев качества диагностики;
- значимости контролируемых показателей;
- других факторов.

Выбор этих факторов, обеспечивающих необходимую точность диагностики, является важной задачей.

Цель исследования – разработка программного комплекса, который в автоматическом режиме, анализируя исходные данные о результатах предшествующей эксплуатации, давал бы заключение о работоспособности объекта и прогнозировал бы его состояние по заданным показателям функционирования.

Агрегированные классификаторы в задачах машинного обучения

Как уже отмечалось, для решения задачи диагностики могут быть использованы различные методы машинного обучения: наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов, композиционные методы (бэггинг и бустинг) и др. При этом не существует универсальной модели, которая могла бы спрогнозировать состояние технического объекта с явным преимуществом.

Для повышения точности диагностики могут быть применены агрегированные методы классификации, которые используют комбинацию базовых моделей, построенных на обучающей выборке. При этом надо определить, какие методы обучения использовать (например, в системе Matlab, в которой решалась задача, построены 11 методов классификации), как их объединить и как принять решение о работоспособности объекта на основе решений отдельных методов?

Перебор всех возможных сочетаний методов классификации дает слишком большое количество моделей и неоправданный объем вычислений. Проведенные численные исследования и их статистический анализ показали, что увеличение числа компонентов в агрегате больше двух не приводит к существенному повышению точности. На практике возможен перебор лишь десяти агрегированных моделей: сочетание лучшей из базовых с одной из остальных. Структуры агрегированных классификаторов могут отличаться друг от друга из-за того, что разбивка исходных данных на обучающую и контрольную выборки производится случайным образом.

Для формирования единого решения о работоспособности объекта на основе решений отдельных методов классификации можно использовать три варианта агрегирования результатов [10, 11]: по среднему значению, по медиане, а также с помощью процедуры голосования.

Построим математическую модель агрегированного метода классификации по среднему значению для двух базовых методов. Предположим, что при проведении диагностики функционирования рассматриваемого объекта наилучшими по заданному критерию оказались метод опорных векторов и один из вариантов бустинга.

Тогда математическая модель агрегированного метода классификации по среднему значению для двух базовых методов – опорных векторов и бустинга – примет вид

$$\hat{P}_{\text{АКср}}(X) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + \exp(-\sum_{j=1}^p w_j x_j + w_0)} + \frac{1}{1 + \exp(-\sum_{i=1}^T \alpha_i h_i)} \right].$$

$\hat{P}_{\text{АКср}}(X)$ – это вероятность того, что при заданной матрице показателей X объект работоспособен, найденная с помощью агрегированного классификатора АК по среднему значению, x_j – показатели функционирования, w_j – параметры метода опорных векторов, определяемые с использованием метода множителей Лагранжа; $h_i(x)$ – базовые классификаторы бустинга; α_i – коэффициент взвешенного голосования для соответствующего классификатора $h_i(x)$, определяемый в зависимости от конкретного метода бустинга (AdaBoost, LogitBoost, GentleBoost и др.). Подобным образом могут быть построены и модели агрегирования для других базовых методов.

Кроме агрегирования, для повышения качества диагностики также зависит от выбранного объема контрольной выборки и способа отбора значимых показателей. Доля контрольной выборки в общем объеме исходных данных (или количество блоков разбиения выборки при кросс-валидации) оказывает неоднозначное влияние на качество классификации: для каждого конкретного технического объекта необходимо оценивать этот фактор индивидуально.

Еще один фактор, существенно влияющий на качество диагностики, – это значимость влияния рассматриваемых показателей функционирования на состояние объекта. Рассматривались два подхода к оценке значимости показателей [12]. Первый подход связан с анализом корреляционной матрицы: например, если коэффициент корреляции между показателем функционирования x_i и состоянием объекта Y ($Y = 1$ – объект работоспособен, $Y = 0$ – объект неработоспособен) близок к нулю, то маловероятно, чтобы такой показатель был значим. Второй подход – оценка значимости регрессоров по критерию Стьюдента в линейной регрессионной модели зависимости состояния объекта Y от показателей x_j .

Учитывая несбалансированность классов при исследовании функционирования технических объектов (количество наблюдений с работоспособными объектами, как правило, значительно больше, чем с неработоспособными), критерием качества классификации следует выбирать F -меру: гармоническое среднее между точностью и полнотой классификации; чем это значение ближе к единице, тем качество классификации лучше. Иногда, при совпадении значений этой меры для различных методов, можно дополнительно использовать в качестве критерия площадь под кривой ошибок [12, 13].

Автоматизированная система диагностики

Для разработки программы диагностики функционирования технического объекта, позволяющей в автоматическом режиме построить наилучшую модель для прогнозирования состояния объекта, использован алгоритм, основанный на результатах изложенного исследования. При этом для расчетов применяется кросс-валидация на всех этапах: при выборе наилучшего объема контрольной выборки, при отборе значимых показателей, при поиске методов обучения, обеспечивающих максимальное значение F -критерия на контрольной выборке.

Вначале пользователю предлагается выбор файла, в котором хранятся исходные данные. Данный файл должен быть в формате .xls или .xlsx, а содержимое файла: первый столбец – отклик, далее – столбцы показателей функционирования технического объекта.

После считывания файла исходных данных (рис. 1) задается объем контрольной выборки. Для сокращения вычислений принимается начальное значение объема контроля 25 %, т.е. при кросс-валидации выборка разбивается на четыре части, три из которых используются для обучения.

Далее проводится обучение по всем 11 базовым методам классификации с использованием всех заданных показателей функционирования объекта (без отбора значимых показателей) на базе

библиотеки инструментов Statistics and Machine Learning Toolbox в пакете Matlab с расчетом F -меры. Выбирается заданное пользователем количество методов (исследования показывают, что достаточно два-три, хотя возможен и полный перебор), показавших наибольшее значение F -меры.

Для отобранных методов исследуется вначале влияние объема контрольной выборки, а затем – способа отбора значимых показателей. Объем контрольной выборки последовательно снижается с 25 до 5 % (соответственно количество блоков разбиения при кросс-валидации равно 20) с шагом 5 %. Для вариантов, в которых F -мера оказалась максимальной, проводится отбор значимых показателей. При этом используются два рассмотренных подхода к оценке значимости.

По результатам проведенных испытаний принимаются значение объема контрольной выборки и показатели, которые будут использованы для продолжения машинного обучения. С учетом этих двух факторов строятся агрегированные классификаторы трех типов – по среднему значению, по медиане и с помощью процедуры голосования. Выбирается модель (включающая вид агрегирования и компоненты агрегата: несколько базовых классификаторов), которая в дальнейшем используется для прогнозирования состояния технического объекта.

Численное исследование

В качестве объекта исследования использовалась система горячего водоснабжения в городе Ульяновск: контроль проводился по данным, снятым со счетчиков водоснабжения. Контролировалась работа системы водоснабжения горячей воды на наличие утечек (система неработоспособна: $Y = 0$) по показателям функционирования: X_1 – температура воды в подающем трубопроводе; X_2 – расход рабочей жидкости в трубопроводе подачи; X_3 – расход рабочей жидкости в трубопроводе «обратки»; X_4 – подаваемое давление; X_5 – обратное давление; X_6 – количество тепловой энергии. Объем исходной выборки составил 756 наблюдений (из них 584 работоспособных состояния).

Задача: используя матрицу X показателей функционирования счетчиков размерностью 756 строк и 6 столбцов и вектор-столбец ответов о наличии или отсутствии утечек в системе Y , разработать модель бинарного классификатора, которая по вновь поступившим показателям функционирования счетчиков даст прогноз о работоспособности системы водоснабжения.

На рис. 1 показаны исходные данные, из которых случайным образом формируются обучающая и контрольная выборки, а на рис. 2 – результаты расчета: наилучшей долей контрольной выборки оказались 25 %; значимость показателей оценивалась по регрессионной модели, при этом незначимым оказался показатель X_6 (количество тепловой энергии); лучшими методами классификации оказались АМ-С (агрегирование по среднему значению) и АМ-М (по медиане), при этом оба метода показали одинаковое значение F -меры ($F = 0,9164$) и одинаковую структуру, включающую ДА – дискриминантный анализ, БДР – бэггинг деревьев решений и GB – метод бустинга GentleBoost.

Загрузить данные							Объем	756
	1	2	3	4	5	6	7	
14	1	66.3000	7.4100	6.4100	2.4400	3.0900	0.0550	^
15	1	66.3100	7.9200	6.3500	2.3500	2.4100	0.0870	
16	0	66.2600	7.9900	6.4900	6	2.5200	0.0840	
17	1	66.2100	8.1900	6.5800	2.1600	4.5100	0.0900	
18	1	66.0700	8.2700	6.8500	2.4600	3.6700	0.0800	
19	1	66.0100	9.0700	6.8500	2.0700	3.1700	0.1260	
20	1	65.9400	9.0400	6.8500	2.4600	5.7200	0.1240	
21	1	65.7700	9.1700	6.8000	2.0800	4.5200	0.1340	
22	1	66.0900	8.2500	6.6800	1.9900	6.2000	0.0880	
23	1	64.7000	7.0700	6.0700	2.0800	2.7100	0.0550	
24	0	56.9300	6.5400	6.1500	2.4600	4	0.0180	
25	0	57.0400	6.1600	5.8800	2.4800	4	0.0130	
26	1	57.2500	6.1100	5.7500	2.1500	1.5600	0.0170	
27	1	57.3200	5.8500	5.7300	2.4800	1.0100	0.0050	v

Рис. 1. Ввод исходных данных

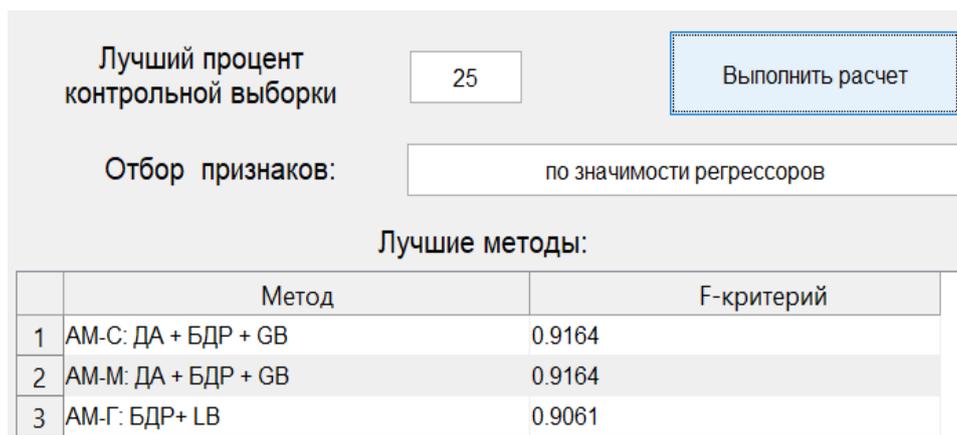


Рис. 2. Результаты расчета

В разработанной программе можно провести прогнозирование нового состояния счетчика. Прогнозирование происходит по лучшему методу, полученному при выполнении основного алгоритма. При вводе данных, например из табл. 1, получаем результат, показанный на рис. 3: $Y = 1$ – счетчик работоспособен, утечка не прогнозируется.

Таблица 1

Новые показатели функционирования счетчика

X1	X2	X3	X4	X5
66,4	8,35	6,41	2,48	3,02

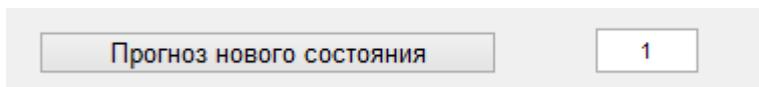


Рис. 3. Прогнозирование нового состояния счетчика

Заключение

Разработаны алгоритм и программный комплекс для диагностики технического состояния объекта с использованием агрегированных классификаторов, включающий в себя: разбиение исходных данных на контрольную и обучающую выборки, отбор значимых признаков, построение базовых и агрегированных классификаторов, поиск наилучшего по F -критерию метода, а также возможность прогнозирования состояния технического объекта. Все перечисленные функции рассчитываются в автоматизированном режиме, тем самым для осуществления диагностики объекта достаточно загрузить данные о его предшествующих состояниях и программный комплекс подберет оптимальные параметры для получения наиболее точного результата.

Путем проведения статистических испытаний показана эффективность разработанных моделей и алгоритмов, при этом значение F -критерия на различных исследуемых выборках за счет применения агрегирования, выбора объема контроля и отбора значимых показателей увеличилось до 15 % относительно базовых методов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области, проект 18-48-730001.

Библиографический список

1. Мишанов, Р. О. Анализ точности классификации электрорадиоизделий для космической аппаратуры в зависимости от времени прогнозирования / Р. О. Мишанов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 112–117.
2. Северцев, Н. А. Методы и модели создания автоматизированных средств контроля для повышения безопасности функционирования технических систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 19–26.

3. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 18–24.
4. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с.
5. Клячкин, В. Н. Прогнозирование и диагностика стабильности функционирования технических объектов / В. Н. Клячкин, В. Р. Крашенинников, Ю. Е. Кувайскова. – Москва : Русайнс, 2020. – 200 с.
6. Klyachkin, V. N. Multivariate Statistical Process Control by Individual Observations / V. N. Klyachkin, I. N. Karpunina // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2019. – Vol. 8 (6S3). – P. 590–593.
7. Воронина, В. В. Теория и практика машинного обучения : учеб. пособие / В. В. Воронина, А. В. Михеев, Н. Г. Ярушкина, К. В. Святков. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 290 с.
8. Neykov, M. On the Characterization of a Class of Fisher-Consistent Loss Functions and its Application to Boosting / M. Neykov, Jun S. Liu, Tianxi Cai // Journal of Machine Learning Research. – 2016. – № 17 (70). – P. 1–32.
9. Wyner, A. J. Explaining the Success of AdaBoost and Random Forests as Interpolating Classifiers / A. J. Wyner, M. Olson, J. Bleich, D. Mease // Journal of Machine Learning Research. – 2017. – № 18 (48). – P. 1–33.
10. Клячкин, В. Н. Диагностика технического состояния аппаратуры с использованием агрегированных классификаторов / В. Н. Клячкин, Ю. Е. Кувайскова, Д. А. Жуков // Радиотехника. – 2018. – № 6. – С. 46–49.
11. Klyachkin, V. N. Aggregated Classifiers for State Diagnostics of the Technical Object / V. N. Klyachkin, J. E. Kuvayskova, D. A. Zhukov // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon – 2019). – Vladivostok, 2019. – Vol. 22. – P. 244–260. – DOI 10.15827/0236–235x.126.244–260.
12. Жуков, Д. А. Особенности диагностики функционирования технического объекта методами машинного обучения / Д. А. Жуков // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сб. – Ульяновск, 2019. – С. 214–216.
13. Davis, J. The relationship between Precision-Recall and ROC curves / J. Davis, M. Goadrich // Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. – Pittsburgh, 2006. – P. 233–240.
14. Жуков, Д. А. Анализ критериев качества классификации при диагностике функционирования технического объекта / Д. А. Жуков // Автоматизация процессов управления. – 2019. – № 3 (57). – С. 112–117.

References

1. Mishanov R. O. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 112–117. [In Russian]
2. Severtsev N. A., Betskov A. V., Dar'ina A. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 19–26. [In Russian]
3. Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 1 (5), pp. 18–24. [In Russian]
4. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 240 p. [In Russian]
5. Klyachkin V. N., Krashenninikov V. R., Kuvayskova Yu. E. *Prognozirovanie i diagnostika stabil'nosti funktsionirovaniya tekhnicheskikh ob"ektov* [Forecasting and diagnostics of the stability of the functioning of technical objects]. Moscow: Rusayns, 2020, 200 p. [In Russian]
6. Klyachkin V. N., Karpunina I. N. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019, vol. 8 (6S3), pp. 590–593.
7. Voronina V. V., Mikheev A. V., Yarushkina N. G., Svyatov K. V. *Teoriya i praktika mashinnogo obucheniya: ucheb. posobie* [Theory and practice of machine learning: a textbook]. Ulyanovsk: UIGTU, 2017, 290 p. [In Russian]
8. Neykov M., Liu Jun S., Cai Tianxi *Journal of Machine Learning Research*. 2016, no. 17 (70), pp. 1–32.
9. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. *Journal of Machine Learning Research*. 2017, no. 18 (48), pp. 1–33.
10. Klyachkin V. N., Kuvayskova Yu. E., Zhukov D. A. *Radiotekhnika* [Radio engineering]. 2018, no. 6, pp. 46–49. [In Russian]
11. Klyachkin V. N., Kuvayskova J. E., Zhukov D. A. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon – 2019)*. Vladivostok, 2019, vol. 22, pp. 244–260. DOI 10.15827/0236–235x.126.244–260.
12. Zhukov D. A. *Sovremennye problemy proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem: sb.* [Modern problems of design, production and operation of radio engineering systems: collection]. Ulyanovsk, 2019, pp. 214–216. [In Russian]
13. Davis J., Goadrich M. *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*. Pittsburgh, 2006, pp. 233–240.
14. Zhukov D. A. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of management processes]. 2019, no. 3 (57), pp. 112–117. [In Russian]

Клячкин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра прикладной математики и информатики,
Ульяновский государственный
технический университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
E-mail: v_kl@mail.ru

Жуков Дмитрий Анатольевич

специалист по базе данных,
Ульяновский филиал конструкторского бюро
ПАО «Туполев»
(Россия, г. Ульяновск, проспект О. К. Антонова, 1)
E-mail: zh.dimka17@mail.ru

Klyachkin Vladimir Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of applied mathematics and informatics,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venec street, Ulyanovsk, Russia)

Zhukov Dmitry Anatolyevich

database specialist,
Ulyanovsk branch of the design bureau
of PJSC Tupolev
(1 O. K. Antonova avenue, Ulyanovsk, Russia)

Образец цитирования:

Клячкин, В. Н. Автоматизированная система диагностики технического состояния объекта с использованием агрегированных классификаторов / В. Н. Клячкин, Д. А. Жуков // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 50–57. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-6.

И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, О. К. Абdirашев, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, O. K. Abdirashev, D. S. Ergaliev, A. D. Tulegulov

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE RESIDUAL LIFE OF THE ELECTRONIC UNIT WITH THE USE OF ACCELERATING FACTORS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Ставится цель – оценить остаточный ресурс изделия для электронного блока. Рассматриваются виды отказов в электронных средствах. Актуальность подобного подхода вызвана экономической целесообразностью, когда невозможна оперативная замена блока. Определение остаточного срока службы является важной концепцией в принятии решений по снижению рисков и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций. Ставится задача оценки остаточного ресурса за счет введения ускоряющих коэффициентов при проведении испытаний для различных видов воздействий. Подробно рассматривается влияние дефектов конденсаторов на остаточный ресурс. *Материалы и методы.* Для предварительной оценки режимов работы электронных схем предложена математическая модель, позволяющая учесть влияние ускоряющих факторов в зависимости от вибраций, температуры и влажности, а также оценить надежность изделия. Для получения зависимости режима работы конденсатора от температуры применяются методы статистической обработки данных, полученных в ходе измерений. *Результаты.* Предложенная методика позволяет учесть температуру в дополнительном коэффициенте, влияющем на расчет надежности. Коэффициент может применяться как в оценочных расчетах на этапе проектирования, так и при эксплуатации изделия на основе данных, получаемых в реальном времени. Данная методика базируется на известных физических моделях и позволяет добиться хорошего совпадения с экспериментальными данными за счет введения весовых коэффициентов. *Выводы.* Предложенная методика позволяет на основе предварительно подготовленных данных оценивать остаточный ресурс блока в зависимости от интегрального изменения таких воздействующих факторов, как вибрация, температура, влажность.

Ключевые слова: остаточный ресурс, надежность, температура, конденсатор, отказы, моделирование.

Abstract. *Background.* The article aims to assess the residual life of the product for the electronic unit. The types of failures in electronic means are considered. The relevance of this approach is due to the economic feasibility, when it is impossible to quickly replace the unit. Determining the remaining service life is an important concept in making decisions to reduce risks and mitigate the consequences of emergencies. The task is to assess the residual life by introducing accelerating factors during testing for various types of impacts. The influence of defects of capacitors on the residual life is considered in detail. *Materials and methods.* For a preliminary assessment of the operating modes of electronic circuits, a mathematical model is proposed that allows taking into account the influence of accelerating factors depending on vibrations, temperature and humidity, as well as assessing the reliability of the product. To obtain the dependence of the operating mode of the condenser on temperature, methods of statistical processing of the data obtained during measurements are used. *Results.* The proposed technique makes it possible to take into account the temperature in an additional coefficient that affects the calculation of reliability. The coefficient can be used both in estimated calculations at the design stage and during the operation of a product based on data obtained in real time. This technique is based on known physical models and allows you to achieve good agreement with experimental data by introducing weighting factors. *Conclusions.* The proposed technique allows, on the basis of previously prepared data, to evaluate the residual resource of the unit depending on the integral change in such influencing factors as vibration, temperature, and humidity.

Keywords: residual life, reliability, temperature, capacitor, failures, modeling.

Введение

Развитие технологий и сегодняшняя тенденция в проектировании микроэлектроники сделали возможным применение все более возрастающих по сложности электронных схем в ответственных применениях с высоким требуемым уровнем надежности. Для таких применений фундаментально важным является наличие средств самодиагностики, позволяющих убедиться в отсутствии либо наличии повышенного риска отказа системы и тем самым распознать приближающийся отказ [1].

Перспективным развитием средств самодиагностики является возможность предсказания срока службы конкретного технического устройства, на основе оценки его остаточного ресурса в конкретный момент времени с учетом характера его эксплуатации. Развитие технологических возможностей производства как электронных компонентов, так и электронных устройств привело к ситуации, когда интенсивность случайных отказов, отказов, связанных с приработкой, снизилась, а интенсивность отказов, связанных с износом, увеличилась [2, 3].

Актуальность прогнозирования остаточного ресурса подпитывается экономической целесообразностью проведения технического обслуживания (либо превентивной замены компонентов), основанного на ключевом параметре – остаточном ресурсе, в отличие от косвенных показателей, таких как наработка (моточасы), пробег, рабочие циклы, срок службы (календарный) и т.п. Определение остаточного срока службы является важной концепцией в принятии решений по снижению рисков и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций.

Данная работа посвящена разработке методики оценки остаточного ресурса электронного блока.

1. Анализ существующих подходов к прогнозированию

В последнее время уделяется особое внимание оперативному прогнозированию остаточного ресурса для сложных изделий и систем с различными видами режимов отказов с целью мониторинга надежности в реальном времени и максимизации экономии.

Прогнозирование основано на анализе режимов разрушения, выявлении ранних признаков износа и старения, а также аварийных состояний. Эффективное прогностическое решение реализуется при наличии достоверных знаний о механизмах сбоев, которые могут привести к деградации, ведущей к возможным сбоям в системе.

Кроме того, накоплен массив данных о различных отказах компонентов и устройств, что делает перспективными статистические подходы к решению задачи оценки остаточного ресурса.

Существуют научные дисциплины под общим названием «управление здоровьем», которые связывают изучение механизмов отказа и управление жизненным циклом системы, включая техническое обслуживание на основе состояния объекта. В рамках этих научных дисциплин развились различные подходы к прогнозам технического состояния объекта.

1.1. Прогнозирование на основе данных

Прогнозирование на основе данных обычно использует методы распознавания образов и машинного обучения для обнаружения изменений в состояниях системы [4]. С математической точки зрения задача сводится к прогнозированию нелинейных систем. Классические методы прогнозирования нелинейных систем включают использование стохастических моделей, а в последние годы внимание направлено на более гибкие решения, такие как нейронные сети.

В общем случае, подходы, основанные на использовании данных, уместны в тех случаях, когда понимание первых принципов функционирования системы не является всеобъемлющим или когда система является достаточно сложной, так что разработка точной модели является непомерно дорогостоящей. Из этого вытекают их главные недостатки и достоинства: требуют большого массива данных для обучения, имеют повышенную вероятность ошибочных предсказаний, не привязаны к узким физическим моделям. Значительным препятствием является необходимость получения данных до отказа, что может быть затруднительно, особенно в приложениях с высокой необходимой надежностью. Кроме того, характер использования устройства может отличаться от режимов, при которых собирались данные, а сбор данных, который включает все возможные будущие использования (как нагрузка, так и условия окружающей среды), часто становится почти невозможным. По-

мимо большого количества данных, в смысле количества обработанных циклов отработки до отказа, модель может оказаться требовательна к качеству данных, так как заранее неизвестно, какие параметры системы необходимо отслеживать. Предпочтительно отслеживать как можно большее количество параметров (эти источники данных могут включать температуру, давление, нефтяные частицы, токи, напряжения, мощность, вибрацию и акустический сигнал, а также иные специфические параметры, такие как радиация и т.д.).

1.2. Прогнозирование на основе моделей

Подход на основе моделей пытается включить физическое понимание происходящего в оценку остаточного ресурса, т.е. задействует физические модели для предсказания технического состояния объекта.

Физические модели различают по подробности рассмотрения физических процессов. На микроуровне физические модели воплощаются в серии динамических уравнений, которые определяют отношения, в данный момент времени или цикла нагрузки, между повреждением (или деградацией) системы/компонента и экологическими и эксплуатационными условиями, в которых система/компонент эксплуатируются. В качестве примера таких моделей могут служить модель усталостной долговечности В. Харриса для шарикоподшипников, которая связывает усталостную долговечность подшипника с индуцированным напряжением, или модель роста трещин Париса и Эрдогана.

Макроуровневая модель – это математическая модель на системном уровне, которая определяет взаимосвязь между входными переменными системы, переменными состояния системы и переменными/выходными измерениями системы, где модель часто является несколько упрощенным представлением системы. При этом неизбежен компромисс между точностью модели, шириной охвата и трудоемкостью модели.

1.3. Гибридные подходы

Гибридные подходы пытаются использовать преимущества как подходов, основанных на данных, так и подходов, основанных на моделях. В действительности редко бывает так, что применяемые на практике методы полностью основаны либо на данных, либо на моделях. Как правило, подходы, основанные на моделях, включают в себя некоторые аспекты подходов, основанных на данных, и подходы, основанные на данных, собирают имеющуюся информацию из моделей. Примером может служить настройка параметров модели с использованием полученных в ходе эксплуатации данных.

В работе [5] рассматривают два вида отказов:

– «Мягкие отказы» (*Soft failures*), которые включают в себя деградационные отказы, обусловленные естественными постепенными процессами старения, и уроном, вызванным внешними воздействиями;

– «Жесткие отказы» (*Hard failures*), которые включают в себя внезапные отказы, обусловленные внешними воздействиями.

Для мягких отказов вводится математическое описание состояния системы:

$$X_k = X_{k-1} + \beta \Delta t + Y_k, \quad (1)$$

где X – состояние системы; k – итерация обновления значения; β – скорость деградации; Δt – промежуток времени между итерациями; Y_k – суммарный урон, полученный системой.

В качестве примера применения такой модели следует отметить диагностику аккумуляторов, так как процессы, происходящие в ячейке при старении, достаточно хорошо изучены и однообразны, что позволяет на основании изменения вышеуказанных параметров давать оценку здоровью (ресурсу) аккумулятора.

Согласно докладу центра перспективной инженерии жизненного цикла (CALCE), в 30 % случаев отказа электронного устройства виновником отказа являются конденсаторы, в 26 % – печатные платы, в 21 % – полупроводники в пластиковых корпусах и в 13 % – пайка [6]. Наглядное представление долей отказов изображено на рис. 1.

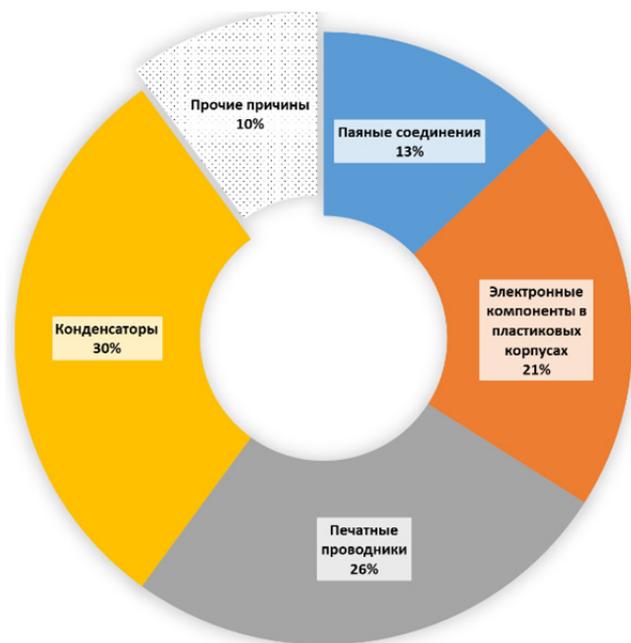


Рис. 1. Доля отказов различных групп компонентов

В исследовании [7] рассматриваются отказы силовых преобразователей с целью более точного отслеживания технического состояния устройства. Распределение отказов по компонентам очень схоже с ранее упомянутым и представлено на рис. 2.

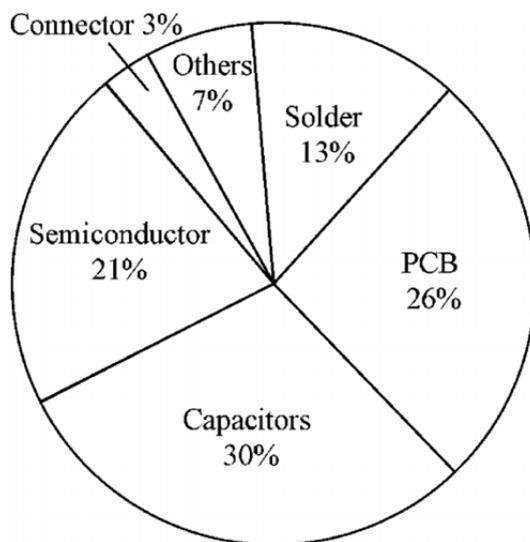


Рис. 2. Распределение отказов по компонентам в силовой электронике: 30 % – конденсаторы; 26 % – печатные платы; 21 % – полупроводники; 13 % – пайка; 3 % – соединители; 7 % – прочее

Таким образом, 90 % отказов происходят по весьма ограниченному количеству типов отказавших составных компонентов. Возможные причины отказов этих типов компонентов легко поддаются анализу.

2. Анализ механизмов отказов электронных компонентов

Рассмотрев механизмы отказов электронных компонентов, станет возможным выяснить причины и условия, подталкивающие электронный компонент к реализации сценария отказа. Отслеживая эти причины и условия, можно будет предупреждать о скором выходе из строя.

При рассмотрении отказов электронных компонентов будем считать, что при проектировании электрической схемы учтены предельные параметры компонентов и не допускаются нерабочие режимы компонентов, т.е. отказ не происходит от того, что устройство работает, устройство работает «правильно».

2.1. Конденсаторы

Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники. Сложно представить электронное устройство, в котором не было бы ни одного конденсатора. Поэтому в первую очередь рассмотрим основные механизмы отказа самых распространенных типов конденсаторов.

Керамические конденсаторы – пожалуй, самый распространенный тип конденсаторов, применяемой сегодня в электронике. Это тип конденсатора, в котором керамика используется как диэлектрический материал.

Одним из наиболее распространенных дефектов керамических конденсаторов является растрескивание диэлектрика. Изначально незначительная неоднородность в структуре конденсатора под влиянием циклических нагрузок активно распространяется в объеме диэлектрика. Внутренняя структура SMD керамического многослойного конденсатора с развившейся трещиной изображена на рис. 3. Наиболее распространенные механизмы отказа керамических конденсаторов приведены в табл. 1.

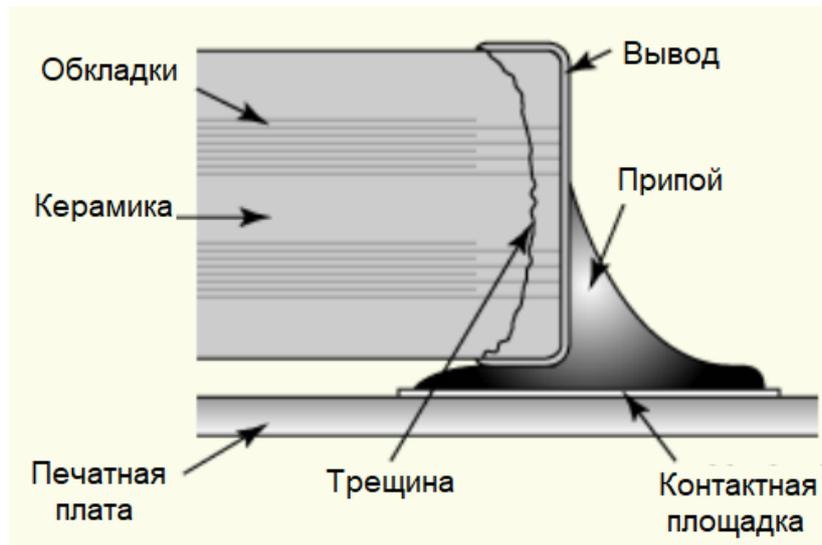


Рис. 3. Растрескивание диэлектрика в керамическом SMD конденсаторе (в разрезе)

Таблица 1

Механизмы отказов керамических конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Растрескивание диэлектрика	Образование трещин в керамике в следствие различных причин. Возможные проявления: запредельный ток утечки, закорачивание, снижение пробивного напряжения, обрыв и т.д. [8]	1. Тепловые удары 2. Резкие скачки напряжения 3. Упругие деформации печатной платы в случае с корпусами для поверхностного монтажа

Пленочные конденсаторы

Пленочные конденсаторы представляют собой конструкцию, в которой диэлектрик выполнен в виде пленки. Структура пленочных конденсаторов также чаще всего является многослойной, как и у керамических конденсаторов. Однако пленочные конденсаторы гораздо стабильнее керамических. Наиболее распространенные механизмы отказа пленочных конденсаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механизмы отказов пленочных конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Перегорание контакта между выводом и обкладкой конденсатора	Перегорание соединения может происходить при больших импульсах тока, а также при долговременном превышении переменного тока (определенной частоты)	1. Перегрев 2. Резкие скачки напряжения
Окисление металлизации	Проникновение влаги происходит из-за негерметичного корпуса и приводит к окислению металлизации. Наиболее уязвимы места крепления ножек [9]	Повышенная влажность

Танталовые конденсаторы

Танталовые конденсаторы – один из видов электролитических конденсаторов. Танталовые конденсаторы являются полярными. Эти конденсаторы характеризуются большой удельной емкостью, слабой температурной зависимостью емкости. В сравнении с алюминиевыми гораздо более долговечны и имеют меньшее эквивалентное последовательное сопротивление. Негативной стороной танталовых конденсаторов является высокая цена и строгие требования по соблюдению допустимых напряжений и токов (нормальной практикой считается использование конденсаторов с номинальным напряжением в два раза больше необходимого, а также ограничение зарядного тока внешним сопротивлением).

Уникальной особенностью танталовых конденсаторов является присущий только им механизм отказа – полевая кристаллизация диэлектрика. В результате механических повреждений или несовершенства технологического процесса в диэлектрике появляются неоднородности, которые являются эпицентрами кристаллизации при заряде конденсатора. Аморфный диэлектрик, кристаллизовавшись, многократно повышает свою проводимость. Если ток заряда не ограничен, процесс кристаллизации принимает лавинообразный характер и приводит к короткому замыканию. Последствием такого отказа может стать взрыв или возгорание [10, 11]. Основные отказы танталовых конденсаторов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механизмы отказов танталовых конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Растрескивание диэлектрика	Растрескивание диэлектрика значительно снижает устойчивость к импульсным токам, увеличивает ток утечки	1. Механические воздействия 2. Тепловые удары
Полевая кристаллизация диэлектрика	Под действием резкого изменения напряженности электрического поля кристаллизуется диэлектрик, его проводимость увеличивается на несколько порядков. Возможные проявления: недопустимый ток утечки, короткое замыкание, взрыв	1. Резкие токи заряда 2. Тепловой удар при пайке

Алюминиевые электролитические конденсаторы

Алюминиевые электролитические конденсаторы являются самой доступной емкостью. Несмотря на традиционно большие размеры алюминиевых конденсаторов, их объемная емкость также является сильной стороной алюминиевых конденсаторов. Алюминиевые конденсаторы так же, как и

танталовые, являются полярными. Хотя алюминиевые конденсаторы обладают несколько худшими электрическими характеристиками в сравнении с танталовыми, являются более неприхотливыми в использовании. Они допускают кратковременное перенапряжение, допускают подачу небольшого (около 1–1,5 вольт) напряжения в обратной полярности. Наиболее распространенные механизмы отказа алюминиевых электролитических конденсаторов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Механизмы отказов алюминиевых конденсаторов

Механизм отказа	Описание механизма	Воздействия, подталкивающие к реализации отказа по данному механизму
Высыхание	Высыхание жидкого электролита из-за невозможности абсолютной герметичности корпуса. Проявляется снижением емкости и увеличением последовательного сопротивления	Повышенная температура

2.2. Обобщение механизмов отказов

Совместное рассмотрение данных из табл. 1–4 указывает на то, что механизмы отказов электронных компонентов технологий производства имеют одни и те же причины, подталкивающие к отказам электроники. Этими факторами являются: повышенная влажность, повышенная температура, перепады температуры (термоциклирование), механические циклические нагрузки (вибрации) и механические удары, повышенное напряжение.

Причина электрического пробоя полупроводника, который провоцируется разрядами статического электричества и при достаточном внимании к этой угрозе на этапе проектирования может быть сведен к минимуму, а в отдельных случаях даже полностью исключен.

Сделанные выводы в целом совпадают с анализом, выполненным в работах [12, 13].

Для того чтобы более наглядно продемонстрировать связь внешних воздействующих факторов на отказы, сгруппируем возможные отказы по воздействующим факторам. Результат представим в табл. 5.

Таблица 5

Связь воздействующих факторов с отказами электроники

Внешний воздействующий фактор	Связанные отказы
Повышенная влажность	1. Окисление металлизации пленочных конденсаторов 2. Образование проводящих нитей на печатной плате 3. Коррозия паяных соединений
Повышенная температура	1. Перегорание контакта между выводом и обкладкой пленочного конденсатора 2. Высыхание электролитического конденсатора 3. Образование проводящих нитей на печатной плате 4. Электромиграция в полупроводниках 5. Коррозия паяных соединений
Перепады температуры	1. Растрескивание диэлектрика в керамических конденсаторах 2. Растрескивание диэлектрика в танталовых конденсаторах 3. Разрушение сквозных металлизированных отверстий в печатных платах 4. Обрыв проволочных перемычек в корпусах полупроводниковых компонентов 5. Трещины кристаллов в корпусах полупроводниковых компонентов 6. Усталостное разрушение паяного соединения
Циклическая механическая нагрузка	1. Растрескивание диэлектрика в керамических конденсаторах 2. Растрескивание диэлектрика в танталовых конденсаторах 3. Отрыв контактных площадок на печатной плате 4. Усталостные разрушения паяного соединения

3. Модель учета влияющих факторов

3.1. Повышенная температура

Рассмотренные выше (см. табл. 5) отказы, которые провоцируются повышенной температурой, являются в своем роде макропроявлениями процессов, проходящих на молекулярном уровне. Поэтому известные зависимости, характеризующие процессы, происходящие на молекулярном уровне, будут справедливы и в отношении оценки остаточного ресурса электроники.

Именно такой подход принят стандартами JEDEC для оценки результатов, полученных при проведении ускоренных испытаний на надежность (Highly accelerated stress test), проводимых по стандарту JESD22-A118 [14].

Ускоренные испытания по стандарту JESD22-A118 представляют собой 96-часовые испытания в герметичной камере, в которой поддерживается постоянная температура воздуха 130 ± 2 °C и влажность воздуха 85 ± 5 %.

Для интерпретации результатов ускоренных испытаний в показатели надежности устройства вводится понятие ускоряющего фактора (AF) – величина, численно равная отношению интенсивности отказов при условиях испытания к интенсивности отказов при рабочих условиях.

Изначально было экспериментально подтверждено, что влияние температуры на процессы старения подчиняется уравнению Аррениуса [15]. Уравнение Аррениуса связывает скорость протекания химической реакции с родом этой реакции и абсолютной температурой. Уравнение приведено в формуле

$$K = Ae^{-\frac{E_0}{kT}}, \quad (2)$$

где K – константа скорости химической реакции; A – частота столкновений реагирующих молекул; E_0 – энергия активации, необходимая для прохождения химической реакции; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана.

Так как при переводе результатов ускоренных испытаний в показатели надежности устройства инженера интересует относительное влияние температуры, то множитель A легко сокращается тем более, что он не имеет смысла применительно к надежности электронных средств.

Энергия активации E_0 характеризует род химической реакции. В случае с процессами старения электроники энергия активации – эмпирическое значение, необходимое для инициации отказа. В каждом конкретном случае (электромиграция, окисление пайки, высыхание электролита и т.д.) необходимая энергия различна. Однако на основании эмпирических данных значение энергии активации для электроники в целом принимается равным 0,6...0,8 эВ [16].

Таким образом, ускоряющий фактор можно рассчитать по формуле

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{экс.}} \right)}, \quad (3)$$

где AF_T – ускоряющий фактор, связанный с температурой; E_a – энергия активации, равная 0,6...0,8 эВ; $T_{н.у.}$ – абсолютная температура, для которой рассчитана интенсивность отказов; $T_{экс.}$ – абсолютная температура эксплуатации; k – постоянная Больцмана.

Далее будем использовать усредненное значение E_a , равное 0,7 эВ. Тогда уравнение (3) можно записать в более практичном виде

$$AF_T = e^{8116 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{экс.}} \right)}, \quad (4)$$

где AF_T – ускоряющий фактор, связанный с температурой; $T_{экс.}$ – абсолютная температура эксплуатации.

3.2. Повышенная влажность

Процессы деградации, усугубляющиеся присутствием влажности, также в обязательном порядке зависят от температуры. Установленная зависимость процессов старения от уровня влажности по своему виду очень похожа на уравнение Аррениуса, однако имеется дополнительный множитель,

учитывающий относительную влажность [17, 18]. Ускоряющий фактор для процессов старения, связанных с влажностью, описывается по формуле

$$AF_H = (RH)^3 e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}} - \frac{1}{T_{эсп.}} \right)}, \quad (5)$$

где AF_H – ускоряющий фактор, связанный с влажностью; E_a – энергия активации; RH – относительная влажность; $T_{эсп.}$ – абсолютная температура эксплуатации; k – постоянная Больцмана.

Заметим, что при уровне относительной влажности в 0 % значение ускоряющего фактора обращается в ноль, что согласуется с физической природой процессов. Для описания процессов старения, связанных с влажностью, принято соотношение $\frac{E_a}{k}$ равным 5235, и перепишем уравнение (5) в более практичном виде

$$AF_H = (RH)^3 e^{5235 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эсп.}} \right)}, \quad (6)$$

где AF_H – ускоряющий фактор, связанный с влажностью; RH – относительная влажность; $T_{эсп.}$ – абсолютная температура эксплуатации.

3.3. Изменение температуры

В течение эксплуатации электронная техника испытывает изменения температуры, вызванные естественными суточными перепадами температуры воздуха, собственным нагревом или другими причинами. Резкие большие перепады температуры являются серьезной нагрузкой для электроники из-за применения материалов с различными температурными коэффициентами расширения.

Для подтверждения устойчивости изделия к перепадам температур проводят испытания на термоциклирование. Изделие помещают в специализированное оборудование – камеру термоциклирования либо в двухсекционную камеру, где подвергают перепадам температуры еще более жестким, чем те, с которыми устройство может столкнуться в процессе эксплуатации.

Испытание на термоциклирование является одним из наиболее жестких, так как позволяет выявить скрытые дефекты конструкции и технологий, скрытые дефекты изделий электронной техники и т.д. Искусственно созданные жесткие перепады температуры позволяют проводить ускоренные испытания, однако результаты таких испытаний сложно интерпретировать.

Для соотнесения лабораторных условий с реальными используется модель Норриса – Ландзберга [19] для усталостного разрушения паяных соединений. Эту же модель в этой работе будем использовать для определения ускоряющего фактора, связанного с изменением температуры.

Ускоряющий фактор, связанный с циклическим изменением температуры, описывается по формуле

$$AF_{TC} = \left(\frac{f_{эсп.}}{f_{н.у.}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta T_{эсп.}}{\Delta T_{н.у.}} \right)^{1.9} e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{н.у.}^{MAX}} - \frac{1}{T_{эсп.}^{MAX}} \right)}, \quad (7)$$

где AF_{TC} – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием; $f_{н.у.}$ – частота изменения температуры в нормальных условиях; $f_{эсп.}$ – частота изменения температуры в условиях эксплуатации; $T_{эсп.}^{MAX}$ – максимальная абсолютная температура эксплуатации; $T_{н.у.}^{MAX}$ – максимальная абсолютная температура в нормальных условиях; $\Delta T_{эсп.}$ – перепад температуры в условиях эксплуатации; $\Delta T_{н.у.}$ – перепад температуры в нормальных условиях; E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана.

Для процессов, связанных с термоциклированием, принято брать соотношение $\frac{E_a}{k}$ равным 1414. Характеристики максимальной температуры и амплитуды перепада для нормальных условий будем основывать на среднесуточном перепаде температуры в городе Москва в июле (самом жар-

ком). Средний максимум составляет 24,3 °С, средний минимум – 14,4 °С [20]. Для удобства счета примем $\Delta T_{н.у.} = 10$ °С; $T_{н.у.}^{MAX} = 25$ °С. А частота изменения температуры в таком случае $f_{н.у.} = 1/\text{день}$. С учетом вышесказанного перепишем уравнение (7) в более удобном виде

$$AF_{TC} = f_{\text{эксп.}}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta T_{\text{эксп.}}}{10} \right)^{1,9} e^{1414 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_{\text{эксп.}}^{MAX}} \right)}, \quad (8)$$

где AF_{TC} – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием; $f_{\text{эксп.}}$ – частота изменения температуры при эксплуатации, день⁻¹; $T_{\text{эксп.}}^{MAX}$ – максимальная абсолютная температура эксплуатации; $\Delta T_{\text{эксп.}}$ – перепад температуры в условиях эксплуатации °С.

4. Общая математическая модель

В процессе эксплуатации электронное устройство подвергается воздействию внешних факторов, которые влияют на скорость протекания процессов старения (износа) электронных компонентов и электрических соединений, выполненных на печатной плате. Характер внешних воздействующих факторов непостоянен и с течением времени может непрерывно изменяться. Очевидно, что при воздействии нескольких воздействующих факторов их влияние складывается и старение электроники происходит быстрее. Отсюда следует, что итоговый ускоряющий фактор будет являться алгебраической комбинацией ускоряющих факторов, связанных с вибрацией, влажностью, температурой и изменением температуры. Запишем это в виде формулы

$$AF = k_V AF_V + k_T AF_T + k_{TC} AF_{TC} + k_H AF_H, \quad (9)$$

где AF – общий ускоряющий фактор; AF_V – ускоряющий фактор, связанный с вибрацией; AF_T – ускоряющий фактор, связанный с температурой; AF_{TC} – ускоряющий фактор, связанный с термоциклированием; AF_H – ускоряющий фактор, связанный с влажностью; k_V, k_T, k_{TC}, k_H – весовые коэффициенты для соответствующих ускоряющих факторов.

Оценка остаточного ресурса должна происходить, отталкиваясь от начального ресурса, заложенного в устройстве. В качестве такового будем использовать среднюю наработку до отказа, вычисленную по «справочному методу». Справочная надежность как раз характеризуется тем, что отражает характеристики компонентов при нормальных условиях.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния [21]. Строго говоря, предельное состояние в общем случае не то же самое, что и неработоспособное состояние. Однако тенденции развития электроники и ее постоянного усложнения привели к тому, что уже сегодня отказавшие модули не ремонтируются в силу большой сложности обнаружения неисправности и ее исправления, а просто заменяются. К тому же в сфере ответственного применения, где целесообразно применение методики оценки остаточного ресурса, повторное использование однажды отказавшего устройства не оправдано.

За основу выражения, описывающего остаточный ресурс электронного блока, возьмем выражение (1). Идея накапливаемых повреждений в состоянии системы, подверженной «мягким отказам», полностью соответствует влиянию внешних воздействий из табл. 5. Остаточный ресурс электронного блока будем определять по формуле

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{cp}} - \int_0^T AF(t) dt, \quad (10)$$

где $T_{\text{ост}}$ – остаточный ресурс электронного блока; T_{cp} – средняя наработка до отказа; T – наработка; $AF(t)$ – общий ускоряющий фактор, изменяющийся во времени; $\int_0^T AF(t) dt$ – эффективная наработка.

Таким образом, уравнения (9) и (10) являются общей математической моделью для оценки остаточного ресурса электронного блока.

4.1. Требования к коэффициентам для ускоряющих факторов

Следуя логике выражений (9) и (10), заметим, что коэффициенты k_v , k_T , k_{TC} и k_H должны быть такими, чтобы при функционировании устройства в нормальных условиях его эффективная наработка совпадала с собственно наработкой. Запишем это условие в виде соотношения

$$T_{н.у.} = \int_0^{T_{н.у.}} AF(t)_{н.у.} dt, \tag{11}$$

где $T_{н.у.}$ – наработка в нормальных условиях; $AF(t)_{н.у.}$ – общий ускоряющий фактор в нормальных условиях; $\int_0^T AF(t)_{н.у.} dt$ – эффективная наработка.

В качестве нормальных условий примем следующее:

- средняя температура 20 °С;
- циклическое изменение температуры от 15 до 25 °С один цикл за сутки;
- относительная влажность воздуха 45 %;
- отсутствие механических нагрузок.

Будем считать, что изменение температур от 15 до 25 °С один раз в сутки – незначительно, и общий ускоряющий фактор в нормальных условиях можно считать неизменяющимся $AF(t)_{н.у.} = \text{const}$.

Тогда равенство (11) возможно только при $AF(t)_{н.у.} = \text{const} = 1$.

С другой стороны, вычислив общий ускоряющий фактор в нормальных условиях по формуле (9) и формулам (4), (6), (8) для соответствующих ускоряющих факторов, получим

$$1 = k_v \cdot 0 + k_T \cdot 1 + k_{TC} \cdot 1 + k_H \cdot 0,091; \tag{12}$$

$$1 = k_T + k_{TC} + 0,091 \cdot k_H,$$

где k_T – весовой коэффициент для ускоряющего фактора, связанного с температурой; k_{TC} – весовой коэффициент для ускоряющего фактора, связанного с термоциклированием; k_H – весовой коэффициент для ускоряющего фактора, связанного с влажностью.

Конкретные значения этих коэффициентов, а также коэффициента, связанного с вибрацией, подлежат экспериментальному установлению. В качестве начального приближения примем

$$k_T = k_{TC} = k_H = \frac{1}{1+1+0,091} = 0,48.$$

В силу сложностей в определении ускоряющего фактора для вибрации, а также нормировочного требования коэффициенту (так как в нормальных условиях механическая нагрузка отсутствует), для начального приближения примем значение коэффициента, связанного с вибрацией, равным нулю: $k_v = 0$. В дальнейшем, при накоплении достаточного количества данных об отказах, будет возможно провести регрессию, т.е. экспериментально определить, как параметры модели для механических усталостных повреждений, так и весовые коэффициенты.

Таким образом, окончательный вид математической модели для оценки остаточного ресурса электронного блока с начальными коэффициентами примет вид

$$T_{ост} = T_{ср} - \int_0^T 0,48(AF_T(t) + AF_{TC}(t) + AF_H(t))dt, \tag{13}$$

где $AF_T(t) = e^{8116 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}$; $AF_{TC}(t) = f_{эксп.}^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\Delta T_{эксп.}}{10} \right)^{1,9} e^{1414 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T_{эксп.}^{MAX}} \right)}$; $AF_H(t) = (RH)^3 e^{5235 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{эксп.}} \right)}$.

4.2. Корректировка значений весовых коэффициентов

Электронные блоки достаточно сильно различаются по используемым компонентам и конфигурации платы, как следствие, в сравнении с другими блоками устройство может оказаться более

восприимчиво к одним воздействующим факторам и менее восприимчиво к другим. Например, высокоскоростное цифровое устройство с плотной конфигурацией платы и широким использованием BGA корпусов и других корпусов с малым шагом выводов будет значительно уязвимо к влажности, термоциклированию и вибрации и почти не восприимчиво к повышенной температуре эксплуатации. Электронное устройство, использующее большое количество электролитических конденсаторов, будет очень восприимчиво к эксплуатации в среде с повышенной температурой. А такая характеристика, как геометрические параметры, сильно влияет на восприимчивость к механическим воздействиям.

При внедрении данной методики в новое устройство необходимо подвергнуть анализу проект электронного блока и методом экспертного оценивания определить значимости каждого из четырех воздействующих факторов. На основе проведенного анализа задать начальное приближение весовых коэффициентов ускоряющих факторов.

Кроме того, при оценке остаточного ресурса предлагаемым способом может оказаться, что производимая оценка сильно отличается от действительного остаточного ресурса: реальные отказы наступают гораздо раньше предполагаемого срока или, наоборот, рассчитываемое значение остаточного ресурса уменьшается слишком быстро и становится равным нулю, а устройство продолжает исправно функционировать.

В таком случае необходима корректировка весовых коэффициентов. Для проведения корректировки полезным будет соотношение вкладов каждого из четырех видов воздействий в эффективную наработку электронного блока. Вклады воздействий в эффективную наработку и их математические выражения представлены в табл. 6.

Таблица 6

Вклады воздействий в эффективную наработку

Вклад	Математическое выражение
Вклад вибрации	$T_V = \int_0^T k_V A F_V(t) dt$
Вклад температуры	$T_T = \int_0^T k_T A F_T(t) dt$
Вклад термоциклирования	$T_{TC} = \int_0^T k_{TC} A F_{TC}(t) dt$
Вклад влажности	$T_H = \int_0^T k_H A F_H(t) dt$

Проведя статистическую обработку вкладов воздействий, данных об испытанных устройствами внешних воздействиях, а также соотношения предсказанных сроков жизни и реальных наработок до отказа на статистически репрезентативной выборке устройств, можно скорректировать весовые коэффициенты таким образом, чтобы снизить расхождение между предсказанным сроком службы и реальной наработкой до отказа.

Корректировку весовых коэффициентов можно также проводить методом экспертного оценивания, а при достаточной выборке разумно использовать методы машинного обучения с учителем, для построения регрессии.

Заключение

Проведенный анализ статистического распределения отказов по компонентам и причин отказов электронных устройств и электронных компонентов позволил продемонстрировать значимость внешних воздействующих факторов в процессах отказов. Был проведен анализ воздействий факторов на продолжительность службы устройства, на основе которого была разработана методика оценки остаточного ресурса электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации.

Таким образом, методика оценки остаточного ресурса электронного блока состоит из следующих шагов:

- 1) анализ условий эксплуатации на наличие перечисленных внешних воздействующих факторов;
- 2) отслеживание и регистрация количественных величин, характеризующих внешние воздействия;
- 3) вычисление ускоряющих факторов на основе данных о внешних воздействующих факторов по формулам (4), (6), (8), (10);
- 4) оценка остаточного ресурса по формуле (12);
- 5) корректировка весовых коэффициентов общей математической модели, параметров модели ускоряющего фактора, связанного с вибрацией.

Следует заметить, что п. 5 является обязательным только на стадии введения методики оценки остаточного ресурса электронного блока.

Предложенная методика позволит на основе предварительно подготовленных данных оценивать остаточный ресурс блока в зависимости от интегрального изменения таких воздействующих факторов, как вибрация, температура, влажность. Методику целесообразно применять в тех случаях, когда отказ электроники может приводить к причинению вреда здоровью человека, а также издержкам, многократно превышающим затраты на своевременное техническое обслуживание или замену.

Библиографический список

1. Catelani, M. On the application of neural networks to fault diagnosis of electronic analog circuits / M. Catelani, M. Gori // *Measurement*. – 1996. – Vol. 17, № 2. – P. 73–80.
2. Vandeveld, B. Methodology for solder-joint lifetime prediction of LED-based PCB assemblies / B. Vandeveld, A. Griffoni, F. Zanon, G. Willems // *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. – 2018. – Vol. 18, № 3. – P. 377–382.
3. Schueller, R. Creep corrosion on lead-free printed circuit boards in high sulfur environments / R. Schueller // *SMTA News and Journal of Surface Mount Technology*. – 2008. – Vol. 21, № 1. – P. 21.
4. Liu, J. A multi-step predictor with a variable input pattern for system state forecasting / J. Liu, W. Wang, F. Golnaraghi // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – Vol. 23, № 5. – P. 1586–1599.
5. Wang, H. Remaining useful life estimation for degradation and shock processes / H. Wang et al. // *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. – Chengdu, China : IEEE, 2013. – P. 1762–1764.
6. Sood, B. Root-Cause Failure Analysis of Electronics / B. Sood. – SMTA Philadelphia, 2013.
7. Yang, S. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review / S. Yang et al. // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2010. – Vol. 25, № 11. – P. 2734–2752.
8. Wang, H. Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters – An overview / H. Wang, F. Blaabjerg // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2014. – Vol. 50, № 5. – P. 3569–3578.
9. Gallay, R. Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis / R. Gallay // *arXiv preprint arXiv:1607.01540*. – 2016.
10. Teverovsky, A. Derating of surge currents for tantalum capacitors / A. Teverovsky // *Space Passive Component Days : ESA 1st International Symposium*. – 2013.
11. Zednicek, T. A Study of Field Crystallization in Tantalum Capacitors and its effect on DCL and Reliability / T. Zednicek, J. Sikula, H. Leibovitz // *CARTS USA*. – 2009. – P. 315–319.
12. Кочегаров, И. И. Особенности исследования динамических характеристик печатных узлов в двухмерных задачах / И. И. Кочегаров, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // *Надежность и качество сложных систем*. – 2015. – № 2.
13. Mathematical modeling of heterogeneous structure dynamics of an electronic block under applied shock / D. V. Artamonov, A. N. Litvinov, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. V. Lysenko // *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. – IEEE, 2018. – P. 224–228.
14. Hallberg, Ö. Recent humidity accelerations, a base for testing standards / Ö. Hallberg, D. S. Peck // *Qual. Reliab. Engng. Int.* – 1991. – Vol. 7, № 3. – P. 169–180.
15. Thermal stability of magnetic tunneling junctions with MgO barriers for high temperature spintronics / X. Liu, D. Mazumdar, W. Shen, B. D. Schrag, G. Xiao // *Applied physics letters*. – 2006. – Vol. 89, № 2. – P. 023504.
16. Huang, C. Y. DOM Products: Activation Energy Estimation and Reliability Assessment / C. Y. Huang, Y. H. Lin, E. Huang // *AMM*. – 2013. – Vol. 470. – P. 781–784.
17. Bojta, P. Searching for appropriate humidity accelerated migration reliability tests methods / P. Bojta // *Microelectronics Reliability*. – 2002. – P. 6.

18. Ohring, M. Environmental Damage to Electronic Products / M. Ohring, L. Kasprzak // Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices. Elsevier. – 2015. – P. 387–441.
19. McNally, L. Board Level Reliability Primer for Embedded Processors / L. McNally. – 2015. – P. 7.
20. Климат Москвы // Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/?curid=364638&oldid=111514964> (дата обращения: 05.09.2020).
21. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.

References

1. Catelani M., Gori M. *Measurement*. 1996, vol. 17, no. 2, pp. 73–80.
2. Vandavelde B., Griffoni A., Zanon F., Willems G. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2018, vol. 18, no. 3, pp. 377–382.
3. Schueller R. *SMTA News and Journal of Surface Mount Technology*. 2008, vol. 21, no. 1, p. 21.
4. Liu J., Wang W., Golnaraghi F. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009, vol. 23, no. 5, pp. 1586–1599.
5. Wang H. et al. *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. Chengdu, China: IEEE, 2013, pp. 1762–1764.
6. Sood B. *Root-Cause Failure Analysis of Electronics*. SMTA Philadelphia, 2013.
7. Yang S. et al. *IEEE Trans. Power Electron.* 2010, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752.
8. Wang H., Blaabjerg F. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578.
9. Gallay R. *Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis*. 2016. arXiv preprint arXiv:1607.01540.
10. Teverovsky A. *Space Passive Component Days: ESA 1st International Symposium*. 2013.
11. Zednicek T. A., Sikula J., Leibovitz H. *CARTS USA*. 2009, pp. 315–319.
12. Kochegarov I. I., Tan'kov G. V., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 2. [In Russian]
13. Artamonov D. V., Litvinov A. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. *2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*. IEEE, 2018, pp. 224–228.
14. Hallberg Ö., Peck D. S. *Qual. Reliab. Engng. Int.* 1991, vol. 7, no. 3, pp. 169–180.
15. Liu X., Mazumdar D., Shen W., Schrag B. D., Xiao G. *Applied physics letters*. 2006, vol. 89, no. 2, p. 023504.
16. Huang C. Y., Lin Y. H., Huang E. *AMM*. 2013, vol. 470, pp. 781–784.
17. Bojta P. *Microelectronics Reliability*. 2002, p. 6.
18. Ohring M., Kasprzak L. *Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices*. Elsevier. 2015, pp. 387–441.
19. McNally L. *Board Level Reliability Primer for Embedded Processors*. 2015, p. 7.
20. *Klimat Moskvy* [The Climate Of Moscow]. Wikipedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/?curid=364638&oldid=111514964> (accessed: 05.09.2020). [In Russian]
21. GOST 27.002-2015 *Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniya* [GOST 27.002-2015 Reliability in engineering (SSNT). Terms and definitions]. [In Russian]

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Kochegarov Igor' Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratievich

doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design and
production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Абдирашев Омирзак Коптилеуович

старший преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Нур-Султан (Астана),
ул. К. Сатпаева, 2А)
E-mail: omeke_92@mail.ru

Ергалиев Дастан Сырымович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой космической техники
и технологий,
Евразийский Национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Нур-Султан (Астана),
ул. К. Сатпаева, 2А)
E-mail: DES-67@yandex.kz

Тулугулов Аамандос Дабысович

кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационных технологий,
Казахский университет технологий и бизнеса
(Казахстан, г. Нур-Султан (Астана),
ул. К. Мухамедханова, 37 А)
E-mail: tad62@yandex.kz

Abdirashev Omirzak Koptileuovich

senior lecturer,
sub-department of space engineering and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilyov
(2A K. Satpayev street, Nur-Sultan (Astana), Kazakh-
stan)

Ergaliev Dastan Syrymovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of space engineering
and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilyov
(2A K. Satpayev street, Nur-Sultan (Astana), Kazakh-
stan)

Tulegulov Amandos Dabysovich

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
head of sub-department of information technology,
Kazakh University of Technology and Business
(37 A K. Muhamedhanova street, Nur-Sultan (Astana),
Kazakhstan)

Образец цитирования:

Методика оценки остаточного ресурса электронного блока с использованием ускоряющих факторов / И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, О. К. Абдирашев, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулугулов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 58–72. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-7.

В. А. Березнев

СИСТЕМА БЕЗАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ

V. A. Bereznev

SYSTEM FOR TROUBLE-FREE CONTROL OF A ROBOTS GROUP

Аннотация. Рассматривается задача одновременного управления группой роботов. Для каждого робота заданы начальная и конечная точки пути. Особенность заключается в том, что прямолинейное движение роботов из начальной точки в конечную невозможно из-за наличия препятствий. Предполагается, что препятствия имеют круговую форму. Наличие препятствий делает весьма проблематичным использование классических методов синтеза оптимального управления или математического программирования в силу невыпуклости области допустимых траекторий роботов. В основе предлагаемого подхода лежит разделение искомых траекторий роботов на отдельные участки, на каждом из которых нет препятствий. Поиск различных вариантов таких траекторий базируется на теории графов, а движение на каждом из участков без препятствий сводится к задаче синтеза оптимального быстрого действия с фазовыми ограничениями. Кроме того, предлагается алгоритм, исключающий возможность столкновения роботов во время движения.

Ключевые слова: задача оптимального управления, теория графов, задача о кратчайшем пути, управление роботом.

Abstract. The problem of simultaneous control of robots group is considered. For each of robots the start and end points of the path are set. Feature the problem is that it is impossible to move robots in a straight line from the starting point to the end point due to the presence of obstacles. It is assumed that obstacles have a circular shape. The presence of obstacles makes it very problematic the use of classical methods of optimal control synthesis or mathematical programming due to non-convexity region of admissible trajectories of the robots. The proposed approach is based on is the segregation of the desired trajectories of robots in certain areas each of which has no obstacles. Search for different options such as the trajectory is based on graph theory, and the movement on each of the sections without obstacles it is reduced to the problem of optimal control synthesizing with phase restrictions. In addition, an algorithm, eliminates the possibility of robots colliding while driving is proposed.

Keywords: optimal control problem, graph theory, the problem of the shortest path, control of the robot.

Рассмотрим задачу управления группой из K роботов, для каждого из которых заданы начальная точка траектории x_{k0} и конечная точка x_k^* , $k \in \overline{1, K}$, где k – индекс робота. Предполагается также, что роботы начинают движение одновременно. Пусть на плоскости заданы круговые препятствия так, что траектории движения роботов, которыми предстоит управлять, не должны иметь общих точек с этими кругами. Круговые препятствия заданы координатами своих центров $C_j(x_{1,j}, x_{2,j})$ и длинами радиусов r_j , $j \in \overline{1, J}$. Целью управления является минимизация времени, затрачиваемого каждым роботом на перемещение из точки x_{k0} в точку x_k^* (рис. 1).

Традиционным подходом к решению этой задачи является использование методов оптимального управления, основанных на принципе максимума Л. С. Понтрягина (см., например, работы [1, 2], а также [3–5]). В этом случае поведение роботов описывается дифференциальными уравнениями второго порядка

$$\ddot{x}_k = f(x_k, \dot{x}_k, u_k), \quad k \in \overline{1, K}, \quad (1)$$

где $u_k = u_k(t)$ – действительный управляющий параметр, подчиненный условию

$$u^- \leq u_k(t) \leq u^+, \quad (2)$$

а $x_k(t) \in \mathbb{R}_2$. Условие непересечения траекторий роботов $x_k(t)$ с круговыми областями препятствий означает, что для любого t должны выполняться неравенства

$$\|x_k(t) - C_j\| > r_j, \quad k \in \overline{1, K}, \quad j \in \overline{1, J}. \quad (3)$$

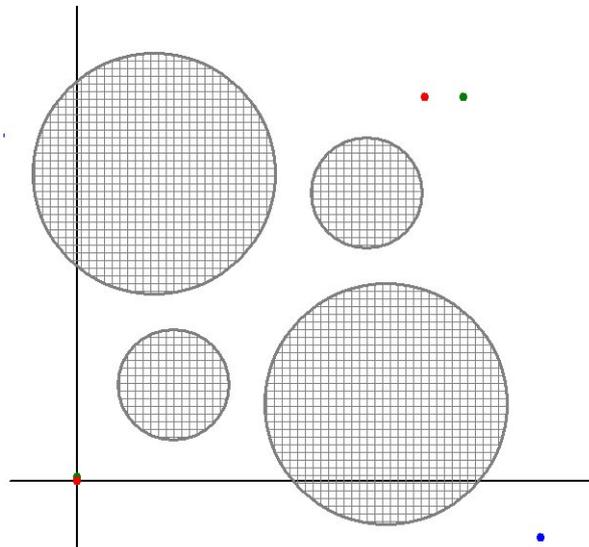


Рис. 1. Круговые препятствия

Эти условия означают невыпуклость области допустимых траекторий роботов, в силу чего использование методов оптимального управления, как и методов математического программирования (см., например, [6–9]) становится весьма проблематичным. Известны и некоторые эвристические подходы ([10, 11]).

Предлагаемые результаты основаны на известной теории синтеза оптимальных управлений в нелинейных системах второго порядка (см., например, [2]), а также на методе построения кратчайшего пути на связном ориентированном плоском графе [12]. В частности, предлагаемый подход является некоторой модификацией предложенного в работе [13] метода и заключается в следующем.

Окружности, являющиеся границами круговых препятствий, снабжаются некоторыми точками, объявляемыми вершинами $v_i, i \in \overline{1, n}$ связного ориентированного графа $\Gamma(S, V)$, где $V = \{v_i\}$ – множество вершин графа, а $S = \{s_{ij}\}$ – множество ребер $i, j \in \overline{1, n}$. Длина ребра $s_{ij} \in S$ определяется временем прохождения робота от вершины v_i к вершине v_j , причем в качестве времени берется решение задачи оптимального быстрогодействия.

В фазовых координатах $x^1 = x$ и $x^2 = \dot{x}$ уравнение (1) для каждого $k \in \overline{1, K}$ записывается в виде нормальной системы (индекс робота временно опускаем)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= f(x^1, x^2, u). \end{aligned} \quad (4)$$

Мы ограничимся рассмотрением линейного случая, когда $\ddot{x} = u$. При этом предполагается, что на отрезке $[v_i, v_j]$, где рассматривается задача синтеза оптимального управления, нет препятствий. В противном случае мы считаем, что длина ребра графа $s_{ij} = +\infty$. Кроме того, будем предполагать, что в точке v_i объект начинает движение с линейной скоростью, а в конечную точку v_j должен прибыть со скоростью $x^2 = q_j \geq 0$. В этих условиях, как это следует из работы [2], управляемый объект относится к классу неосциллирующих, принцип максимума оказывается не только необхо-

димым, но и достаточным условием оптимальности, и, кроме того, справедлива следующая лемма [2, с. 282].

Лемма 1 Каждое оптимальное по быстрдействию управление, осуществляющее переход из любой начальной точки в любую конечную точку, принимает только значения $u(t) = u^-$ либо $u(t) = u^+$ и имеет не более одного переключения.

В связи с леммой 1 уместно сделать одно важное замечание. Утверждение леммы о числе переключений управления сделано при отсутствии какого-либо ограничения сверху на \dot{x}^1 . Вместе с тем очевидно, что если имеет место ограничение $\dot{x}^1 \leq \hat{q}$, то в зависимости от значения u^+ и длины пути s_{ij} возможны одно или два переключения со значениями управления u^+ , 0 , u^- .

Обратимся к вопросу о назначении весов графа. Естественным требованием при построении траектории движения робота является ее гладкость (дифференцируемость) на всем протяжении. Это означает, что обход роботом кругового препятствия должен начинаться и заканчиваться в точках касания к окружностям, являющимся границами препятствий (рис. 2). В число вершин (помимо точек касания) естественно включить заданные начальную $v_{k0} = x_{k0}$ и конечную $v_{kn} = x_k^*$ точки траектории, где $k = \overline{1, K}$.

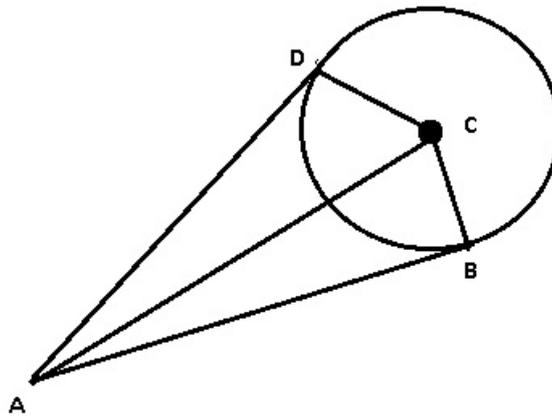


Рис. 2. Определение вершин графа

Пусть $A(x_{01}, x_{02})$ – произвольная точка плоскости, а $C(x_{j1}, x_{j2})$ – заданная точка, являющаяся центром j -го кругового препятствия. Тогда очевидно, что координаты точек B и D являются решениями нелинейной системы уравнений

$$\begin{aligned} (x_{01} - x_1)(x_{j1} - x_1) + (x_{02} - x_2)(x_{j2} - x_2) &= 0, \\ (x_1 - x_{j1})^2 + (x_2 - x_{j2})^2 &= r_j^2, \end{aligned} \tag{5}$$

где r_j – радиус j -го кругового препятствия.

С помощью несложных преобразований легко установить, что решениями системы (5) являются точки (x_1, x_2) , где в случае, когда $x_{02} \neq x_{j2}$, компонента x_1 является решением квадратного уравнения $ax^2 + bx + c = 0$ при

$$\begin{aligned} a &= (x_{01} - x_{j1})^2 + (x_{02} - x_{j2})^2, \\ b &= -2x_{j1}(x_{02} - x_{j2})^2 - 2\omega(x_{01} - x_{j1}) + 2x_{j2}(x_{01} - x_{j1})(x_{02} - x_{j2}), \end{aligned}$$

$$c = \omega^2 - \tau(x_{02} - x_{j2})^2 - 2x_{j2}\omega(x_{02} - x_{j2}),$$

$$\tau = r_j^2 - x_{j1}^2 - x_{j2}^2,$$

$$\omega = \tau + x_{01}x_{j1} + x_{02}x_{j2}.$$

Наконец, если $x_{02} = x_{j2}$, то x_1 вычисляется по формуле $x_1 = \frac{\omega}{x_{01} - x_{j1}}$, а значение компоненты

x_2 получаем из второго уравнения системы (5).

Теперь рассмотрим построение касательных к двум кругам (рис. 3).

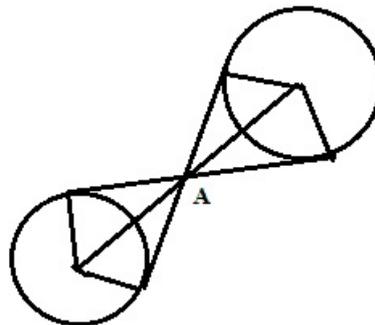


Рис. 3. Касательные к препятствиям

Очевидно, что из подобия следует, что точка A является единственной точкой пересечения касательных и прямой, соединяющей центры кругов. Следовательно, можно вычислить координаты точки A , после чего задача сводится к рассмотренной выше.

Таким образом, любая траектория любого робота представляет собой последовательность участков, часть которых является прямолинейными участками между двумя вершинами графа без препятствий, а другая – участками движения с постоянной скоростью по дуге окружности. Для любого робота такие траектории образуют некоторое конечное множество, из которого может быть сделан выбор с целью минимизации времени движения. С этой целью воспользуемся алгоритмом Дейкстры [12] построения кратчайшего пути на графе.

Наконец, обратимся к проблеме безаварийности управления роботами. Оптимальные с точки зрения быстродействия маршруты роботов могут получиться таковыми, что некоторые из них окажутся в некоторой малой окрестности одной и той же точки в тот или иной момент времени, т.е. $\|x_k(t) - x_p(t)\| \leq \varepsilon$ для некоторого t и некоторого заданного малого значения $\varepsilon > 0$. Это означает, что в модель управления необходимо включить условия

$$\|x_k(t) - x_p(t)\| > \varepsilon \tag{6}$$

для любого t и любых k и p .

Предположим, что в некоторый момент $\tau > 0$ условие (6) нарушается (рис. 4) для k -го и p -го роботов, причем k -й робот преодолевает первый прямолинейный участок трассы с двумя переключениями (случай одного переключения исследуется аналогично). Следовательно, робот достигает скорости \tilde{q} за время $t_0 = \frac{\tilde{q}}{u^+}$. Если предположить, что робот начинает движение с ускорением $\tilde{u} < u^+$, то он достигнет скорости за время $t_1 = \frac{\tilde{q}}{\tilde{u}}$. Пусть начиная с этого момента времени робот сохраняет все параметры своей траектории. Тогда к моменту t_1 разница в пройденном расстоянии составит

$$\Delta S = \frac{u^+ t_0^2}{2} + \tilde{q}(t_1 - t_0) - \frac{\tilde{u} t_1^2}{2},$$

следовательно, на эту же величину увеличится расстояние между роботами в момент τ . Таким образом, по условию безаварийности требуется, чтобы $\Delta S \geq \varepsilon$. Отсюда после несложных преобразований получаем, что условие (6) будет выполнено, если для $t \in [0, t_1]$ и только на этом участке траектории робота в качестве управления взять $\tilde{u} = \frac{2\varepsilon u^+ + \tilde{q}^2}{u^+ \tilde{q}^2}$.

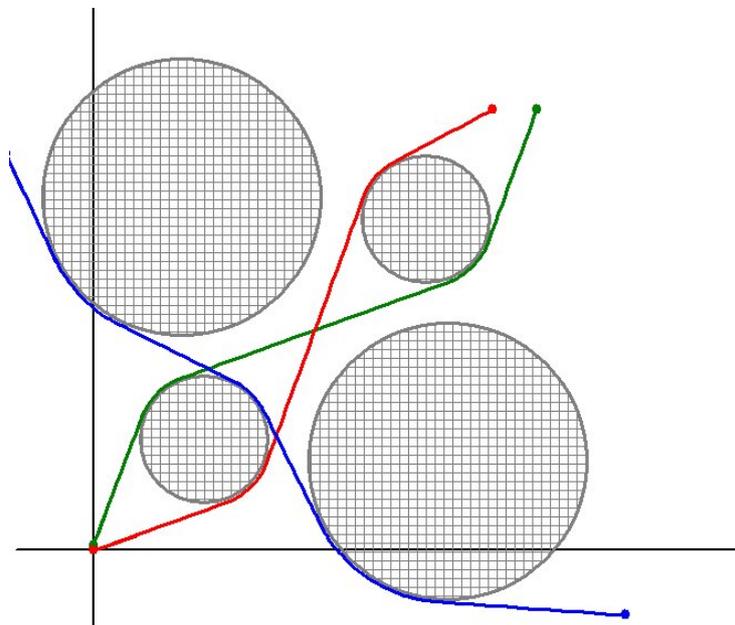


Рис. 4. Оптимальные траектории роботов

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-03061-мк).

Библиографический список

1. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – Москва : Наука, 1983. – 393 с.
2. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский. – Москва : Наука, 1968. – 408 с.
3. Арутюнов, А. В. Необходимые условия оптимальности второго порядка в задачах оптимального импульсного управления / А. В. Арутюнов, Д. Ю. Карамзин, Ф. Л. Перейра, Н. Ю. Черникова // Дифференциальные уравнения. – 2018. – Т. 54, № 8. – С. 1100–1118.
4. Карамзин, Д. Ю. Принцип максимума Понтрягина для задачи оптимального управления с фазовыми ограничениями при ослабленных предположениях управляемости / Д. Ю. Карамзин // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2018. – № 20. – С. 46–61.
5. Karamzin, D. Yu. A generalized Filippov-like theorem for optimal control problems with constraints / D. Yu. Karamzin, V. A. de Oliveira, F. L. Pereira, G. N. Silva // Intelligent Systems 2018 : Proceedings of the 13-th International Symposium. – 2018. – P. 478–487.
6. Карманов, В. Г. Математическое программирование / В. Г. Карманов. – Москва : Наука, 2000. – 264 с.
7. Измаилов, А. Ф. Численные методы оптимизации / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – Москва : Наука, 2003.
8. Дарьина, А. Н. О решении дифференциальных вариационных неравенств методами ньютоновского типа / А. Н. Дарьина // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2018. – № 20. – С. 159–166.
9. Daryina, A. N. A class of active-set newton methods for mixed complementarity problems / A. N. Daryina, A. F. Izmailov, M. V. Solodov // SIAM J. Optimization. – 2004. – Vol. 15. – P. 109–120.
10. Прокопьев, И. В. Функция определения движения мобильного робота / И. В. Прокопьев // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2018. – № 20. – С. 18–27.
11. Betskov, A. V. Problem of cost fuction synthesis for mobile robot's trajectory and the network operator method for its solution / A. V. Betskov, I. V. Prokopyev, A. E. Ilinbaev // Intelligent Systems 2018 : proceedings of the 13-th International Symposium. – 2018. – P. 695–701.

12. Dijkstra, E. W. A note on two problems in connection with graphs / E. W. Dijkstra // Numer. Math. Springer Science + Business media. – 1959. – Vol. 1, № 1. – P. 269–271.
13. Березнев, В. А. Метод редукции пространства состояний для решения задачи оптимального управления / В. А. Березнев, А. И. Дивеев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 17–25.

References

1. Pontryagin L. S., Boltyanskiy V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka, 1983, 393 p. [In Russian]
2. Boltyanskiy V. G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Mathematical methods of optimal control]. Moscow: Nauka, 1968, 408 p. [In Russian]
3. Arutyunov A. V., Karamzin D. Yu., Pereyra F. L., Chernikova N. Yu. *Differentsial'nye uravneniya* [Differential equations]. 2018, vol. 54, no. 8, pp. 1100–1118. [In Russian]
4. Karamzin D. Yu. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem* [Questions of the theory of security and stability of systems]. 2018, no. 20, pp. 46–61. [In Russian]
5. Karamzin D. Yu., de Oliveira V. A., Pereira F. L., Silva G. N. *Intelligent Systems 2018: Proceedings of the 13-th International Symposium*. 2018, pp. 478–487.
6. Karmanov V. G. *Matematicheskoe programmirovaniye* [Mathematical programming]. Moscow: Nauka, 2000, 264 p. [In Russian]
7. Izmailov A. F., Solodov M. V. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Moscow: Nauka, 2003. [In Russian]
8. Dar'ina A. N. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem* [Questions of the theory of security and stability of systems]. 2018, no. 20, pp. 159–166. [In Russian]
9. Daryina A. N., Izmailov A. F., Solodov M. V. *SIAM J. Optimization*. 2004, vol. 15, pp. 109–120.
10. Prokop'ev I. V. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem* [Questions of the theory of security and stability of systems]. 2018, no. 20, pp. 18–27. [In Russian]
11. Betskov A. V., Prokopyev I. V., Ilinbaev A. E. *Intelligent Systems 2018: proceedings of the 13-th International Symposium*. 2018, pp. 695–701.
12. Dijkstra E. W. *Numer. Math. Springer Science + Business media*. 1959, vol. 1, no. 1, pp. 269–271.
13. Bereznev V. A., Diveev A. I. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 3 (27), pp. 17–25. [In Russian]

Березнев Валентин Александрович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Управление робототехническими устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: va_bereznev@mail.ru

Bereznev Valentin Alexandrovich

doctor of physical and mathematical sciences,
senior researcher,
Robot control center,
Federal research center
"Computer Science and Management"
of the Russian Academy of Sciences
(40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Березнев, В. А. Система безаварийного управления группой роботов / В. А. Березнев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 73–78. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-8.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 621.3

DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-9

К. А. Муравьев, И. О. Алябьев, Д. С. Синютина, А. И. Шушуев

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

K. A. Murav'ev, I. O. Alyab'ev, D. S. Sinyutina, A. I. Shushuev

ALGORITHMS MIC DESIGN OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

Аннотация. В работе проанализированы технологические платформы для построения беспроводных сенсорных сетей. Проведено комплексное сравнение схмотехнических решений типовых узлов. Произведена классификация архитектур и аппаратных решений сенсорных сетей. Предложена типовая структура узла беспроводной сенсорной сети. Обобщены основные аспекты применения для базовых платформ энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей. Показано, что основная тенденция развития энергоэффективных беспроводных сенсорных сетей состоит в том, что маломощные устройства из низкого ценового сегмента преобладают в сборе ограниченного, однотипного набора данных, в то время как устройства из верхнего ценового сегмента используются для требовательных приложений и глобальной координации, организации, установки параметров сети. Предложен способ для работы устройств с высокой вычислительной мощностью. Предложен способ модернизации этих узлов для более эффективной работы в области применения.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, сенсоры, энергопотребление, энергоэффективность, отказоустойчивость, алгоритмы управления, микроконтроллер.

Abstract. The paper analyzed technology platforms for building wireless touch networks. Complex comparison of schematic solutions of typical units was carried out. The architectures and hardware solutions of sensor networks have been classified. Disclosed is a typical structure of a wireless sensor network node. The main aspects of application for basic platforms of energy-efficient wireless sensor networks are summarized. It has been shown that the main trend of the development of energy efficient wireless sensor networks is that low-power devices from the low price segment prevail in the collection of a limited, single-type set of data, while devices from the upper price segment are used for demanding applications and global coordination, organization, setting of network parameters. Disclosed is a method for operating devices with high computational power. Disclosed is a method of modernising these units for more efficient operation in the field of application.

Keywords: wireless sensor networks, sensors, power consumption, energy efficiency, fault tolerance, control algorithms, microcontroller.

Введение

Беспроводные сенсорные сети активно внедряются в различных отраслях, позволяя эффективно решать сложные задачи автоматизации и управления, мониторинга и контроля, оперируя большими массивами входящих и обрабатываемых исходных данных [1–5]. Взаимодействуя с управляющими устройствами, датчики создают распределенную, самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации [6].

Беспроводная сенсорная сеть – это самоорганизующаяся AD HOC сеть, т.е. сеть с децентрализованным режимом работы, когда клиентские станции взаимодействуют непосредственно друг с другом без точки доступа [7, 8]. Таким образом, понятие «самоорганизующаяся сеть» определяется как система, в которой отдельные устройства «умеют» сами находить друг друга и формировать сеть, более того, в случае выхода из строя какого-либо из узлов оставшиеся могут перенастраиваться, переориентироваться, устанавливая новые маршруты для передачи сообщений.

Каждый узел представляет собой миниатюрное устройство, оснащенное сенсорами. Их значительное количество и размещение в ключевых точках мониторинга ситуации или изучаемых процессов позволяет осуществлять сбор информации с больших площадей в течение длительного времени, что в свою очередь предоставляет возможность отслеживать и анализировать явления, ранее недоступные.

Одним из главных достоинств и конкурентных преимуществ технологии сенсорных сетей является способность функционирования без необходимости прокладки дорогостоящих кабелей вместе со вспомогательным оборудованием (кабельными каналами, клеммами, шкафами и т.д.). А поскольку сенсорная сеть поддерживает основные интерфейсы и протоколы, которые применяются в нашей стране в настоящее время, есть реальная возможность интегрировать ее в существующую сеть без проведения дополнительной масштабной и дорогостоящей реконструкции.

Целью работы является анализ и обобщение способов алгоритмического проектирования беспроводных сенсорных сетей с точки зрения энергоэффективности, генерации структурной схемы узла беспроводной сенсорной сети с минимальным энергопотреблением.

Используя предлагаемый авторский подход генерационного синтеза, конкретный функционал узлов формируется исходя из конкретного класса решаемых задач. Применение модульных решений позволит сгладить существующие различия между типовыми конкретными узлами. Дальнейшее расширение количества возможных вариантов базовых компонентов аппаратно-программной платформы благотворно повлияет на решение конкретной задачи за счет дальнейшей типизации, унификации и стандартизации.

Анализ алгоритмического проектирования беспроводных сенсорных сетей

В сенсорной сети узлы обычно взаимодействуют посредством беспроводной связи – радио, инфракрасного излучения или оптических сигналов [9–12]. Инфракрасная связь сравнительно дешева и проста в производстве, доступна без лицензии и защищена от помех электрических приборов, но требование прямой видимости между отправителем и получателем усложняет использование данной технологии в беспроводных сенсорных сетях [13–15]. В случае использования оптических сигналов предъявляются дополнительные требования к узлам сети – антенны узлов должны обладать нужной высотой и мощностью излучения для связи с другими устройствами, что требует повышенного энергопотребления, в противном случае могут возникнуть ошибки и большие помехи [13–15]. В беспроводной сенсорной сети наилучшим вариантом является использование радиосвязи, в частности, полос частот для промышленных, научных и медицинских целей ISM, которые доступны без лицензий в большинстве стран. Основными преимуществами использования ISM является широкий спектр частот и доступность по всему миру. Они не привязаны к конкретному стандарту, тем самым дают большую свободу для реализации энергосберегающих стратегий в сенсорных сетях. Для организации радиосвязи между узлами в беспроводной сенсорной сети чаще всего используются следующие технологии передачи данных: ZigBee, Bluetooth или Wi-Fi [16–20]. Их сравнительный анализ приведен в табл. 1.

Протоколы ZigBee дают возможность создавать самоорганизующиеся и самовосстанавливающиеся сенсорные сети. В этом случае устройства сети благодаря встроенному программному обеспечению обладают способностью при включении питания сами находить друг друга и форми-

ровать сеть, а в случае выхода из строя какого-либо из узлов – устанавливать новые маршруты для передачи данных. Протоколы ZigBee позволяют устройствам находиться в спящем режиме большую часть времени, что значительно продлевает срок службы батареи.

Таблица 1

Сравнительный анализ технологий организации связи узлов беспроводных сенсорных сетей

Параметры	Стандарты		
	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)
Частоты	0,868/0,915/2,4 ГГц	2,4 ГГц	2, 4, 5–6 ГГц
Количество каналов	1/10/16	79	14
Скорость передачи	20–250 Кбит/с	3 Мбит/с	11 Мбит/с – 10 Гбит/с
Радиус действия устройств	10–100 м	10 м	20–300 м
Полоса пропускания канала	0,3/0,6 МГц; 2 МГц	1 МГц	22 МГц
Количество устройств в сети	65 536	7	10
Потребляемый ток	30 мА, в режиме ожидания 3 мА	40 мА, в режиме ожидания 0,2 мА	400 мА, в режиме ожидания 20 мА
Области применения	Удаленный мониторинг и управление	Передача мультимедийной информации	Замещение проводного соединения

Сенсорные сети могут быть реализованы также на основе беспроводной технологии Bluetooth. Специально для беспроводных сенсорных сетей была разработана версия спецификации ядра технологии Bluetooth v.4.0, получившая название Bluetooth Low Energy (BLE), характеризующаяся низким энергопотреблением. Устройства, использующие BLE, могут работать более года на одной миниатюрной батарее без подзарядки.

Беспроводные сети Wi-Fi изначально были задуманы как способ замены проводных вычислительных сетей. Однако относительно высокие скорости передачи делают перспективным возможное применение в тех самоорганизующихся сенсорных сетях, в которых необходимо передавать большие объемы информации в реальном времени, например, видеосигналы.

Как видно из таблицы, за счет меньшего потребления энергии и, как следствие, большего времени работы, а также большего радиуса действия устройств, чем у устройств Bluetooth, наилучшим вариантом для беспроводных сенсорных сетей является ZigBee.

Беспроводные сенсорные сети могут быть классифицированы на основе различных концепций – в зависимости от типа и метода развертывания узлов в сети, от их расположения, от окружающей среды и т.д. (рис. 1).

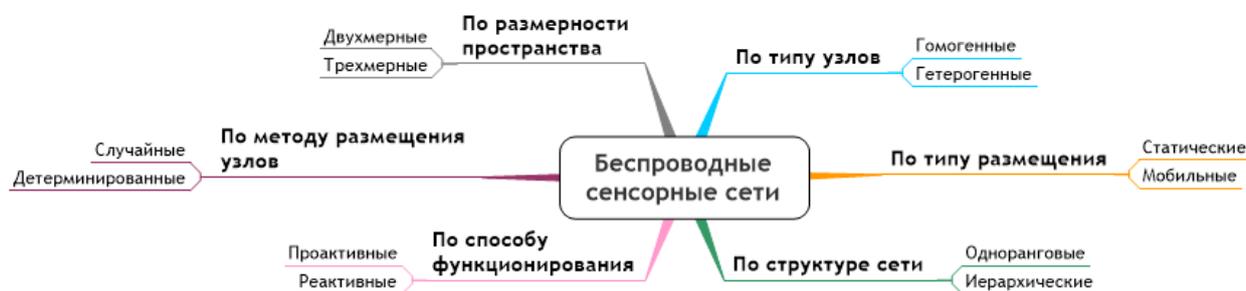


Рис. 1. Классификация архитектур сенсорных сетей

Рассмотрим классификацию беспроводных сенсорных сетей подробнее. На основе способа функционирования сенсорные сети принято подразделять на проактивные и реактивные. В проактивной беспроводной сенсорной сети узлы периодически проверяют среду и передают данные, представляющие интерес. В реактивных сетях узлы оперативно реагируют лишь на внезапные и резкие изменения в области сенсорного поля. Очевидно, что затраты энергии происходят во время

приема или передачи данных, выполнения контрольно-измерительных операций, в связи с чем пребывание максимального количества узлов в «спящем режиме», значительно увеличивает продолжительность автономной работы всей системы.

В зависимости от составляющих узлов беспроводные сенсорные сети могут быть разделены на два основных типа – гомогенные (однородные) и гетерогенные (неоднородные). В гомогенных беспроводных сенсорных сетях все сенсорные узлы одинаковы с точки зрения энергии батареи и аппаратной сложности. Гетерогенные же сенсорные сети могут содержать несколько типов различных узлов, с различными энергетическими и функциональными возможностями, что дает ряд преимуществ (рис. 2).



Рис. 2. Гетерогенная модель беспроводной сенсорной сети

Для выбора варианта использования энергоресурсов в гетерогенных сетях прибегают к методам балансировки нагрузки – распределению заданий между несколькими сетевыми устройствами [21–26]. Вычислительная неоднородность сети может уменьшить задержку обработки информации для ближайших узлов, а гетерогенность сетевых ресурсов – сократить время обслуживания запросов. Средний расход энергии также перераспределяется между узлами разных типов, снижая ее потребление, а использование в гетерогенной сети узлов с высокой пропускной способностью и мощными радиопередатчиками значительно повышает надежность передачи данных во всей сети, обеспечивает отказоустойчивость работы сети [27–30].

По критерию структуры сети беспроводные сенсорные сети разделяют на одноранговые и иерархические. В одноранговой сети все узлы выполняют одинаковые задачи, передача данных на базовую станцию осуществляется непосредственно. В иерархических сетях узлы подразделяются на головные и сенсорные. Сенсорные узлы собирают данные, а головные занимаются их обработкой, анализом и передачей на базовую станцию. Данный раздел принято связывать с топологией сети. К иерархическим топологиям относятся «звезда» и «кластерное дерево». В этом случае сеть разбивается на сегменты, в которых объекты функционально разделяются на координаторы и конечные узлы. Координатор осуществляет глобальную координацию, организацию и установку параметров сети, осуществляет выход во внешнюю сеть. Конечные узлы, в свою очередь, выполняют только прикладные действия – сбор информации и управление удаленным объектом. Хотя данный способ организации сети ввиду его особенностей подходит для решения ограниченного спектра задач, он выделяется наименьшими затратами энергии, так как координаторы в таких топологиях чаще всего напрямую подключены к стационарной сети. К одноранговой сети относится топология «точка-точка», в которой разделение на сегменты не требуется. Узлы могут общаться между собой в пределах области видимости, самостоятельно организовывать сети и адекватно реагировать на изменения топологии сети. Такая гибкость в использовании позволяет организовывать более сложные конфигурации сети, решать широкий спектр нестандартных задач, но, к сожалению, с данной топологией связан увеличенный расход энергии ввиду резкого возрастания времени пребывания узлов в рабочем состоянии.

По отношению к методу размещения сенсорных узлов выделяют сети со случайным и с детерминированным размещением узлов. При случайном размещении сенсорные узлы могут быть случайным образом разбросаны по некоторой области. Детерминированное размещение предполагает размещение узлов в соответствии с предварительно определенным планом построения сети.

Беспроводные сенсорные сети могут быть классифицированы в зависимости от способности менять свое географическое положение на статичные и мобильные. Мобильные сенсорные узлы применяются при мониторинге движущихся объектов.

С учетом размерности пространства применения выделяют двухмерные и трехмерные сенсорные сети, что накладывает отпечаток на радиус покрытия сенсорного узла, а также на особенности работы протоколов передачи данных.

Для дополнительного увеличения продолжительности автономной работы узлов беспроводной сенсорной сети стоит отдать предпочтение энергосберегающим протоколам передачи данных, таким как LEACH, OEDSR, RT2.

Алгоритм LEACH является модификацией базового протокола TDMA. Представляет собой иерархический протокол, ключевой задачей которого является минимизация энергии, необходимой для создания и обслуживания кластеров сенсоров. LEACH имеет существенный недостаток – отсутствие информации о текущем энергетическом состоянии узла, что негативно влияет на надежность передачи данных в системе.

Энергетическая же выгодность протокола OEDSR заключается в том, что все узлы находятся в режиме ожидания или состоянии сна, а при возникновении события «просыпается» только подсеть рядом с местом возникновения события.

Протокол RT2 также делит сеть, но уже на сенсорные и активные узлы, первые из которых осуществляют обнаружение события, а вторые – обрабатывают данные и передают информацию. Это также выгодно сказывается на энергоэффективности.

Не стоит также забывать, что на потребление энергии оказывают влияние способы локализации узлов беспроводной сенсорной сети. Особенно хочется выделить метод локализации по уровню силы сигнала (RSSI) и радиоинтерференционную систему позиционирования (RIPS).

Наряду с программными способами увеличения энергоэффективности следует отметить и аппаратные, которые заключаются в замене первичного непerezаряжаемого источника питания на перезаряжаемый, а также подключение устройства к преобразователю энергии. Существует множество постоянно доступных источников энергии – свет, вибрации, температурный дифференциал, магнитная энергия и преобразователи, способные использовать эту энергию, соответственно – фотогальванический, электростатический или электромагнитный, термоэлектрический и индуктивный. Эффективность и мощность каждого преобразователя варьируются. Суть алгоритмического метода синтеза БСС состоит в последовательном использовании программных и аппаратных методов обеспечения энергоэффективности за счет использования типовых узлов БСС.

Анализ типовой структуры узла сенсорной сети

Рассмотрим обобщенную структуру узла беспроводной сенсорной сети (рис. 3).

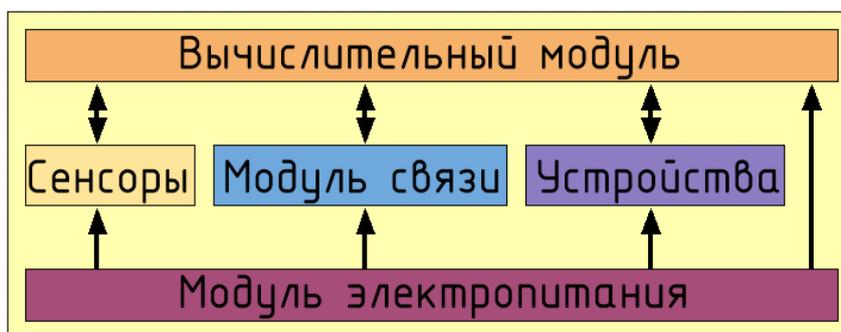


Рис. 3. Обобщенная архитектура узла сенсорной сети

Узел беспроводной сенсорной сети, как видно из рисунка, состоит из вычислительного модуля, модуля электропитания, модуля беспроводной связи, а также исполнительных устройств и различного рода сенсоров, считывающих информацию из окружающей среды [31–33].

Рассмотрим каждый элемент структуры подробнее. Вычислительный модуль представляет собой микроконтроллер – микропроцессор со встроенной памятью, таймерами и оборудованием для подключения внешних устройств, таких как датчики, исполнительные устройства и радиопередатчики. Вычислительный модуль запускает программное обеспечение беспроводного сенсорного узла. Для корректной работы устройства микроконтроллер должен иметь низкое энергопотребление, а также наличие аппаратных ресурсов для работы узла в составе сети.

Датчики (сенсоры) и исполнительные устройства дают возможность узлу взаимодействовать с окружающим физическим миром.

Модуль беспроводной связи нужен для организации взаимодействия между узлами сети. В качестве данного модуля используют трансиверы. Стоит отметить, что из аппаратных средств узла именно радиоприемопередатчик обычно является наиболее энергоемким компонентом.

Модуль электропитания предназначен для обеспечения долговременной бесперебойной работы узла сенсорной сети. Батарейки являются самым распространенным источником питания для современных платформ. При рациональном выборе остальных компонентов, а также наличии программного обеспечения энергетического менеджмента срок службы узла на литиевых батарейках увеличивается. Рассмотрим основные типовые модульные аппаратные решения проектирования узлов сенсорной сети (рис. 4).

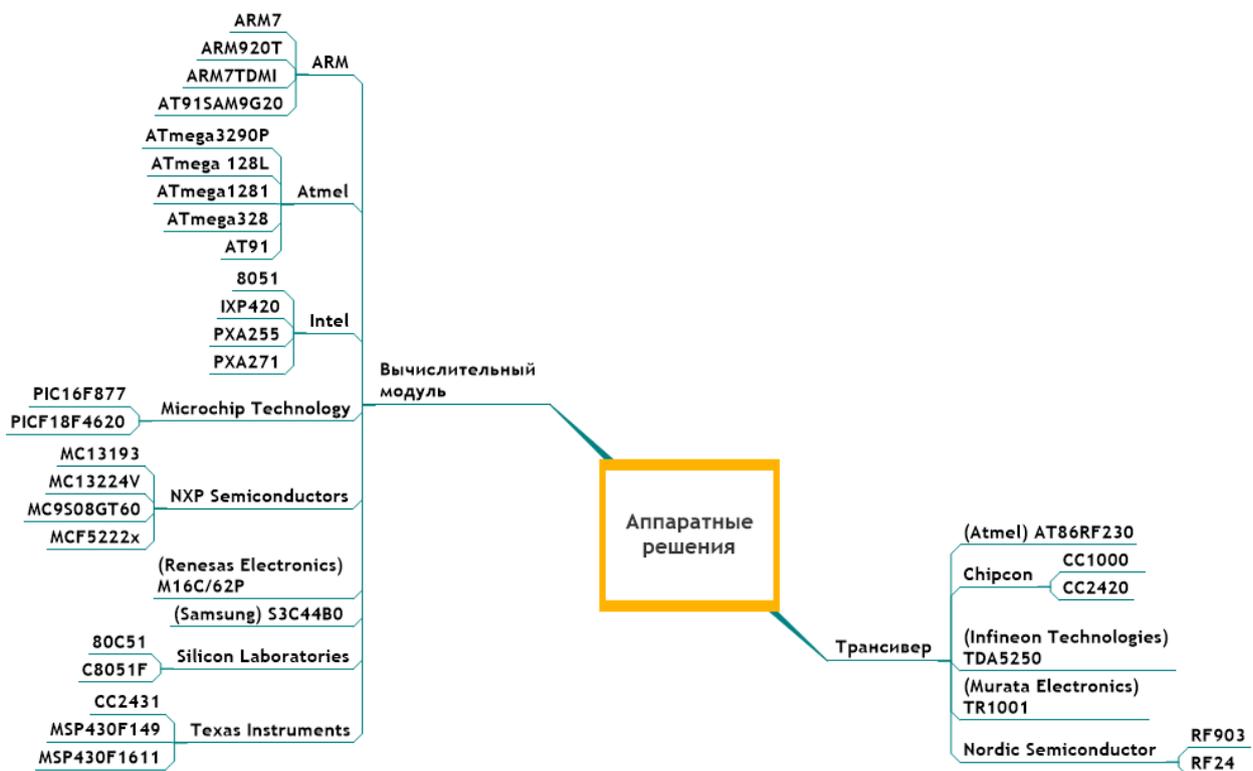


Рис. 4. Классификация аппаратных решений сенсорных сетей

Исходя из приведенной классификации, можно сделать вывод о том, что критически необходимыми для работы компонентами являются: вычислительный модуль, модуль электропитания и модуль беспроводной связи. В то время как сенсоры, добавляемые производителем на плату платформы, являются лишь приятным дополнением, так как с помощью разъемов, размещенных на плате, можно подключить все требуемые расширения. Из рисунка видно, что на данный момент на рынке аппаратного обеспечения присутствует большое количество различных электронных комплектующих, подходящих для реализации узла беспроводной сенсорной сети, что дает производителям аппаратно-программных платформ большой простор для ее модернизации и расширения функционала под решение конкретных, стоящих в повестке дня задач. При этом для сокращения сроков проектирования на первый план выходят задачи модельного анализа БСС на начальных этапах проектирования [31–33].

Концепция эффективной платформы для проектирования беспроводных сенсорных сетей

На основании проведенного анализа существующих аппаратно-программных платформ было выявлено, что минимизация энергопотребления беспроводной сенсорной сети напрямую связана с использованием стека протоколов ZigBee. Для улучшения показателей сама платформа, на которой базируется узел, должна удовлетворять ряду следующих аппаратных требований:

- минимальное энергопотребление приемопередатчика и модуля обработки полученных данных;
- отсутствие встроенных датчиков и исполнительных устройств. Все необходимые сенсоры должны подключаться с помощью разъемов расширения с целью экономии электроэнергии на не использующихся устройствах;
- наличие алгоритмически аппаратного уменьшения энергопотребления.

Исходя из требований к узлу беспроводной сенсорной сети, можно предложить улучшенную типовую структурную схему (рис. 5). Данная схема помимо классических элементов включает также таймер и коммутатор. Их структурное назначение состоит в том, чтобы удерживать наиболее энергоемкие элементы платформы выключенными или в спящем режиме, когда они не требуются [34, 35]. В базовом варианте таковыми элементами могут быть модуль беспроводной связи и вычислительный модуль.

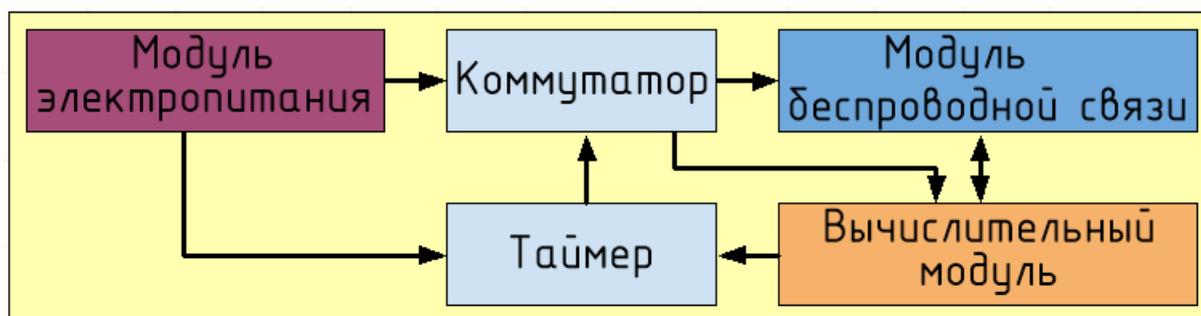


Рис. 5. Концепция эффективной платформы для проектирования беспроводных сенсорных сетей

Данная типовая схема работает следующим образом:

1. Таймер подает сигнал на коммутатор, чтобы он подключил модуль беспроводной связи и вычислительный модуль к питанию.
2. Модуль беспроводной связи получает информацию по беспроводному каналу связи и передает ее вычислительному модулю.
3. Вычислительный модуль принимает информацию и обрабатывает ее требуемым образом.
4. По необходимости вычислительный модуль отправляет модулю беспроводной связи обработанную или новую информацию, которую необходимо передать.
5. В случае надобности передачи информации модуль беспроводной связи передает ее по беспроводным каналам связи в сети, по окончании передачи модуль беспроводной связи посылает вычислительному модулю сигнал о том, что передача закончена.
6. Вычислительный модуль, получив все необходимые сигналы от модуля беспроводной связи, посылает сигнал таймеру, что все необходимые задачи выполнены и можно отключать питание.
7. Таймер, получив сигнал об окончании работ, посылает сигнал коммутатору о необходимости отключения энергоемких элементов от питания. Через некоторое количество тактов таймера переходим к шагу 1.

Заключение

В работе основное внимание уделено практической реализации типовых узлов беспроводных сенсорных сетей на основе современных коммерчески доступных аппаратных средств, обеспечивающих минимальное энергопотребление. Можно констатировать, что рынок БСС устройств делится на две категории: бюджетные устройства и устройства высокого класса.

Конкретный функционал узлов формируется чаще всего исходя из узкого класса решаемых задач, но модульные решения могут сгладить существующие различия между конкретными моделями. Дальнейшее расширение количества возможных вариантов базовых компонентов аппаратно-программной платформы благотворно влияет не только на решение какой-то определенной задачи, но и на весь рынок беспроводных сенсорных сетей в целом за счет дальнейшей типизации, унификации и стандартизации.

Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».

Библиографический список

1. Володин, К. И. Информационная система сопровождения разработки встраиваемого программного обеспечения для беспроводных сенсорных сетей / К. И. Володин, А. И. Переходов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 85–90.
2. Design methods of teaching the development of internet of things components with considering predictive maintenance on the basis of mechatronic devices / A. I. Vlasov, A. V. Yudin, V. A. Shakhnov, K. A. Usov, M. A. Salmina // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, № 20. – P. 9390–9396.
3. Власов, А. И. Системный анализ технологии обмена и хранения данных BLOCKCHAIN / А. И. Власов, А. А. Карпунин, И. П. Новиков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С. 75–83.
4. Демидов, Д. Е. Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики / Д. Е. Демидов, Н. В. Будылдина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 50–58.
5. Власов, А. И. Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // Датчики и системы. – 2018. – № 1 (221). – С. 24–30.
6. Исследование алгоритмов кластеризации в беспроводных сенсорных сетях // Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. – URL: http://diss.vlsu.ru/uploads/media/Diss_Nasser.pdf (дата обращения: 30.04.2020).
7. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring / A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson // Ad Hoc & Sensor Wireless Networks. – 2004. – № 47. – P. 399–423.
8. Власов, Д. С. Исследование качественных показателей беспроводных AD-HOC сетей / Д. С. Власов, Д. С. Коновалов, К. А. Муравьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 155–158.
9. Краснобрый, Б. В. Анализ беспроводных сенсорных сетей на основе стандарта ZIGBEE / Б. В. Краснобрый, И. В. Лавров, К. А. Муравьев, А. И. Чебова // Научно-технические конференции : сб. XV Молодеж. науч.-техн. конф. – Москва, 2013. – С. 306–314.
10. Зимин, Д. В. Анализ проблем энергоэффективности беспроводных сетей передачи данных на базе стека протоколов ZIGBEE / Д. В. Зимин, К. А. Муравьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 195–197.
11. Санталов, Г. Д. Методика проектирования электронных устройств в концепции «Интернета вещей» / Г. Д. Санталов, К. А. Муравьев, В. В. Леонидов // Проектирование и технология электронных средств. – 2019. – № 1. – С. 10–22.
12. Муравьев, К. А. Анализ принципов построения самоорганизующихся сенсорных сетей / К. А. Муравьев, Д. Г. Манушян // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 296–301.
13. Лаборатория физических основ и технологий беспроводной связи. – URL: <https://wl.unn.ru/study/?page=4> (дата обращения: 07.03.2020).
14. Общие сведения о беспроводных сенсорных сетях. – URL: <https://sibstutis.ru/upload/4b6/%D0%92%D0%9A%D0%A0.pdf> (дата обращения: 30.04.2020).
15. Дядюнов, А. Н. Моделирование беспроводных сенсорных сетей / А. Н. Дядюнов, К. Н. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2009. – № 139. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-besprovodnyh-sensornyh-setey> (дата обращения: 28.04.2020).
16. Адамов, А. П. Протоколы обмена в беспроводных сенсорных сетях регистрации событий / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенов, А. Т. Темиров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 124–132.
17. Камакин, А. С. Разработка защищенного метода передачи данных между устройствами и анализ скорости передачи информации / А. С. Камакин, А. А. Павельев // Технологии инженерных и информационных систем. – 2019. – № 4. – С. 3–9.

18. Муравьев, К. А. Анализ протоколов передачи данных самоорганизующихся сенсорных сетей / К. А. Муравьев, Т. А. Цивинская, Д. Г. Манушян // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 2. – С. 142–145.
19. Власов, А. И. Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // Датчики и системы. – 2018. – № 1 (221). – С. 24–30.
20. Денисенко, Н. А. Исследования сенсорной сети датчиков давления / Н. А. Денисенко, А. В. Лавров, К. А. Муравьев, А. И. Чебова // Датчики и системы. – 2013. – № 9 (172). – С. 51–55.
21. Муравьев, К. А. Методы управления сетевым трафиком гетерогенных распределенных телекоммуникационных систем / К. А. Муравьев, В. В. Терехов // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 2. – С. 15–21.
22. Муравьев, К. А. Программно-аппаратный комплекс мониторинга распределенных телекоммуникационных систем / К. А. Муравьев, В. В. Терехов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 324–329.
23. Yuldashev, M. N. Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine learning methods / M. N. Yuldashev, A. I. Vlasov, A. N. Novikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015. – P. 032153.
24. Vlasov, A. I. Load balancing in big data processing systems / A. I. Vlasov, K. A. Muraviev, A. A. Prudius, D. A. Uzenkov // International Review of Automatic Control. – 2019. – Vol. 12, № 1. – P. 42–47.
25. Yuldashev, M. N. Mathematical model of the general problem of state classification in wireless sensor networks / M. N. Yuldashev, A. I. Vlasov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012002.
26. Власов, А. И. Методы упреждающего прогнозирования состояния широкополосной сети связи / А. И. Власов, В. В. Иванов, И. А. Косолапов // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1. – С. 3–6.
27. Адамов, А. П. Беспроводные сенсорные сети с нулевой мощностью / А. П. Адамов, А. А. Адамова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 261–264.
28. Адамов, А. П. Повышение надежности элементов сенсорной сети за счет снижения токопотребления чувствительного элемента сенсора / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 136–141.
29. Адамов, А. П. Энергоэффективные технические решения для беспроводных сенсорных сетей / А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 142–148.
30. Иванова, Г. С. Анализ алгоритмов консенсуса в блокчейн-системах / Г. С. Иванова, К. А. Володин // Технологии инженерных и информационных систем. – 2019. – № 1. – С. 35–44.
31. Prisyazhnik, S. P. Method of wireless sensor networks simulation / S. P. Prisyazhnik, K. A. Muraviev, A. S. Zakharova // Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – 2018. – P. 8570125.
32. Муравьев, К. А. Анализ показателей качества систем передачи данных / К. А. Муравьев, В. В. Терехов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 128–133.
33. Власов, А. И. Гауссовские процессы в регрессионном анализе состояний беспроводной сенсорной сети с учетом электромагнитных помех / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – № 3 (62). – С. 35–43.
34. Бетанов, В. В. Радиочастотные методы локализации в беспроводных сенсорных сетях / В. В. Бетанов, Л. С. Восков, Р. О. Курпатов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2011. – № 2. – С. 44–49.
35. Восков, Л. С. Сравнительный анализ методов локализации в беспроводных сенсорных сетях / Л. С. Восков, Р. О. Курпатов // Качество. Инновации. Образование. – 2011. – № 3. – С. 35–39.

References

1. Volodin K. I., Perekhodov A. I. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 1 (9), pp. 85–90. [In Russian]
2. Vlasov A. I., Yudin A. V., Shakhnov V. A., Usov K. A., Salmina M. A. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 20, pp. 9390–9396.
3. Vlasov A. I., Karpunin A. A., Novikov I. P. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Simulation]. 2017, no. 3 (55), pp. 75–83. [In Russian]
4. Demidov D. E., Budyldina N. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 50–58. [In Russian]
5. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 1 (221), pp. 24–30. [In Russian]
6. *Issledovanie algoritmov klasterizatsii v besprovodnykh sensorykh setyakh* [Investigation of clustering algorithms in wireless sensor networks]. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy im.

- prof. M. A. Bonch-Bruevicha. Available at: http://diss.vlsu.ru/uploads/media/Diss_Nasser.pdf (accessed 30.04.2020). [In Russian]
7. Mainwaring A., Polastre J., Szewczyk R., Culler D., Anderson J. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*. 2004, no. 47, pp. 399–423.
 8. Vlasov D. S., Konovalov D. S., Murav'ev K. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 155–158. [In Russian]
 9. Krasnobryzhiy B. V., Lavrov I. V., Murav'ev K. A., Chebova A. I. *Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy: sb. XV Molodezh. nauch.-tekhn. konf.* [Science-intensive technologies and intelligent systems: sat. XV. sci. - tech. conf.], Moscow, 2013, pp. 306–314. [In Russian]
 10. Zimin D. V., Murav'ev K. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 195–197. [In Russian]
 11. Santalov G. D., Murav'ev K. A., Leonidov V. V. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic devices]. 2019, no. 1, pp. 10–22. [In Russian]
 12. Murav'ev K. A., Manushyan D. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 296–301. [In Russian]
 13. *Laboratoriya fizicheskikh osnov i tekhnologiy besprovodnoy svyazi* [Laboratory of Physical Fundamentals and Technologies of Wireless Communication]. Available at: <https://wl.unn.ru/study/?page=4> (accessed 07.03.2020). [In Russian]
 14. *Obshchie svedeniya o besprovodnykh sensorykh setyakh* [Overview of Wireless Sensor Networks]. Available at: <https://sibsubis.ru/upload/4b6/%D0%92%D0%9A%D0%A0.pdf> (accessed 30.04.2020). [In Russian]
 15. Dyadyunov A. N., Kuznetsov K. N. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* []. 2009, no. 139. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-besprovodnyh-sensornyh-setey> (accessed 28.04.2020). [In Russian]
 16. Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G., Temirov A. T. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 124–132. [In Russian]
 17. Kamakin A. S., Pavel'ev A. A. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem* [Engineering and information system technologies]. 2019, no. 4, pp. 3–9. [In Russian]
 18. Murav'ev K. A., Tsivinskaya T. A., Manushyan D. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 2, pp. 142–145. [In Russian]
 19. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 1 (221), pp. 24–30. [In Russian]
 20. Denisenko N. A., Lavrov A. V., Murav'ev K. A., Chebova A. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2013, no. 9 (172), pp. 51–55. [In Russian]
 21. Murav'ev K. A., Terekhov V. V. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic devices]. 2017, no. 2, pp. 15–21. [In Russian]
 22. Murav'ev K. A., Terekhov V. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 1, pp. 324–329. [In Russian]
 23. Yuldashev M. N., Vlasov A. I., Novikov A. N. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, p. 032153.
 24. Vlasov A. I., Murav'ev K. A., Prudius A. A., Uzenkov D. A. *International Review of Automatic Control*. 2019, vol. 12, no. 1, pp. 42–47.
 25. Yuldashev M. N., Vlasov A. I. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, p. 012002.
 26. Vlasov A. I., Ivanov V. V., Kosolapov I. A. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2011, no. 1, pp. 3–6. [In Russian]
 27. Adamov A. P., Adamova A. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 261–264. [In Russian]
 28. Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G., Temirov A. T. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 136–141. [In Russian]
 29. Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 142–148. [In Russian]
 30. Ivanova G. S., Volodin K. A. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem* [Engineering and information system technologies]. 2019, no. 1, pp. 35–44. [In Russian]
 31. Prisyazhnik S. P., Murav'ev K. A., Zakharova A. S. *Proceedings 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. 2018, p. 8570125.
 32. Murav'ev K. A., Terekhov V. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 128–133. [In Russian]
 33. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости* [Electromagnetic compatibility technologies]. 2017, no. 3 (62), pp. 35–43. [In Russian]

34. Betanov V. V., Voskov L. S., Kurpatov R. O. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences]. 2011, no. 2, pp. 44–49. [In Russian]
35. Voskov L. S., Kurpatov R. O. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2011, no. 3, pp. 35–39. [In Russian]

Муравьев Константин Александрович
старший преподаватель,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: kostiktakaya@gmail.com

Алябьев Илья Олегович
студент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: olego9942@gmail.com

Синютина Дарина Сергеевна
студент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: dsin76@yandex.ru

Шушуев Артемий Игоревич
студент,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: assassin1th@gmail.com

Muravyev Konstantin Aleksandrovich
senior lecturer,
sub-department of design and production technology
of the electronic equipment,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Alyabyev Ilya Olegovich
student,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Sinyutina Darina Sergeyevna
student,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Shushuyev Artemy Igorevich
student,
Bauman Moscow state technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Муравьев, К. А. Алгоритмическое проектирование беспроводных сенсорных сетей / К. А. Муравьев, И. О. Алябьев, Д. С. Синютина, А. И. Шушуев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 79–89. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-9.

В. С. Калашников, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, Н. С. Реута

ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

V. S. Kalashnikov, A. V. Lysenko, G. V. Tan'kov, V. A. Trusov, N. S. Reuta

FORMATION OF THE CONTROL SIGNAL OF THE ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF VIBRATION TESTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании печатных узлов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) необходимо обеспечить вибронадежность узла. Общие рекомендации заключаются в том, что нужно располагать наиболее чувствительные к внешним вибрационным воздействиям радиоэлементы ближе к краям несущей пластины, где амплитуды изгибных колебаний меньше. Но такой путь оправдан только в том случае, когда весь контур несущей платы будет закреплен и в граничных точках платы будет только амплитуда внешнего воздействия. Крепления реальных печатных узлов и плат БРЭА сильно отличаются от закреплений по контуру. Поэтому амплитуда изгибов контура может быть значительной при формировании той или иной моды колебаний. Проведенный анализ показал, что задача размещения радиоэлементов на плате БРЭА не имеет однозначного решения с точки зрения обеспечения виброустойчивости узла на печатной плате. На кафедре КиПРА ПГУ создан и совершенствуется лабораторный стенд, на котором можно тестировать несущие пластины разрабатываемых узлов на печатных платах. Особенность в том, что воздействия на пластину задаются с четырех мини-вибраторов, расположенных по углам пластины. Это позволяет задавать колебания в фазе во все четыре точки крепления и получать резонансные формы, адекватные нечетным гармоникам; а также задавать колебания в противофазе по противоположным сторонам и получать формы, адекватные четным гармоникам. *Материалы и методы.* В работе использовались методы теории волновых процессов, планирования и математического моделирования. *Результаты.* Разработаны условия адаптивного управления задания возбуждающих колебаний, позволяющие сформировать максимум амплитуды стоячей или бегущей волны в требуемом месте платы. В основе управления лежит математическая модель типа «черный ящик» с пошаговым управлением изменением начальных условий возбуждения колебаний. *Выводы.* Выявлено, что, меняя фазу внешнего воздействия в точках крепления, можно в той или иной степени управлять резонансными

Abstract. *Background.* When designing printed circuit boards of onboard radio-electronic equipment (OREE), it is necessary to ensure the vibration reliability of the unit. General recommendations are that the radio elements that are most sensitive to external vibration should be positioned closer to the edges of the carrier plate, where the Flexural vibration amplitudes are smaller. But this way is justified only if the entire contour of the carrier Board is fixed and only the amplitude of the external influence is present at the boundary points of the Board. Fixing of real printed circuit boards and OREE boards is very different from fixing along the contour. Therefore, the amplitude of the contour bends can be significant when a particular mode of oscillation is formed. The analysis showed that the problem of placing radio elements on the OREE Board does not have an unambiguous solution in terms of ensuring the vibration stability of the node on the printed circuit Board. A laboratory stand has been created and is being improved at the Department of design and production of radio equipment of PSU, where you can test non-existing plates of developed components on printed circuit boards. The peculiarity is that the effects on the plate are set from four mini-vibrators located at the corners of the plate. This allows you to set vibrations in the phase at all four points of attachment and get resonant forms that are adequate to odd harmonics; as well as set vibrations in the opposite phase on opposite sides and get forms that are adequate to even harmonics. *Materials and methods.* Methods of wave process theory, planning, and mathematical modeling were used in this work. *Results.* Conditions for adaptive control of the exciting oscillation task are developed, which allow forming the maximum amplitude of a standing or traveling wave in the required place of the Board. The control is based on a mathematical model of the "black box" type with a step-by-step control of changes in the initial conditions of oscillation excitation. *Conclusions.* It is revealed that by changing the phase of external influence at the attachment points, it is possible to control the resonant vibrations of the plate to some extent. Studies have shown that the natural resonant frequencies change or shift, but the forms (modes) of standing and traveling waves are always the same, only

колебаниями пластины. Как показали проведенные исследования, изменяются или сдвигаются собственные резонансные частоты, но формы (моды) стоячих и бегущих волн всегда одинаковые, лишь происходит смещение экстремумов амплитуд в плоскости платы.

Ключевые слова: вибрация, радиоэлектронные средства, печатные платы, резонанс, пластины.

the amplitude extremes shift in the plane of the Board.

Keywords: vibration, radio-electronic devices, printed circuit boards, resonance, plates.

Введение

При проектировании печатных узлов нестационарных (бортовых) РЭС для работы на подвижных носителях одна из главных задач заключается в обеспечении вибронадежности узла. Общие рекомендации для конструктора здесь заключаются в том, что нужно располагать наиболее чувствительные к нагрузкам радиоэлементы (транзисторы, микросхемы) ближе к краям несущей пластины, где амплитуды изгибных колебаний меньше [1–4]. Но такой путь оправдан для случая, когда весь контур несущей пластины будет закреплен и в граничных точках платы будет только амплитуда внешнего воздействия (инерционная составляющая колебаний).

Крепления реальных плат электронных средств сложны и разнообразны [5–7] и резко отличаются от классических (закрепления по контуру), например, крепление платы в четырех точках по углам (винтами) – в этом случае закреплены небольшие зоны по углам, а весь остальной контур свободен и почувствует в изгибных колебаниях пластины в случае вхождения ее в резонанс. Поэтому амплитуда изгибов контура может быть значительной при формировании той или иной моды колебаний (рис. 1).

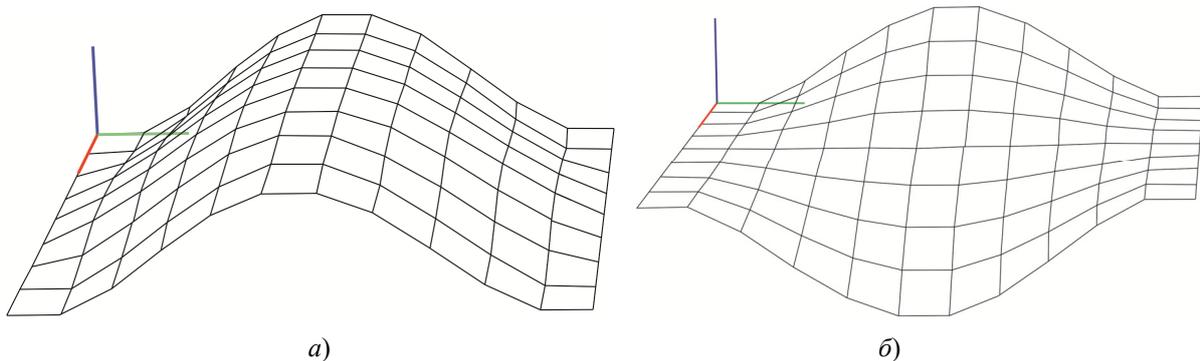


Рис. 1. Форма первых двух мод колебания прямоугольной пластины при точечном креплении по углам

На рис. 1 показаны первая (рис. 1,а) и вторая (рис. 1,б) собственные формы колебаний прямоугольной пластины с четырехточечным креплением, полученные с помощью пакета математического моделирования пластинчатых конструкций кафедры КиПРА ПГУ. По данной стороне пластины амплитуда прогиба контура в первой и второй форме значительна и немного превышает амплитуду внешнего воздействия. Если контур пластины закреплен, то форма колебаний этой пластины несколько иная (рис. 2).

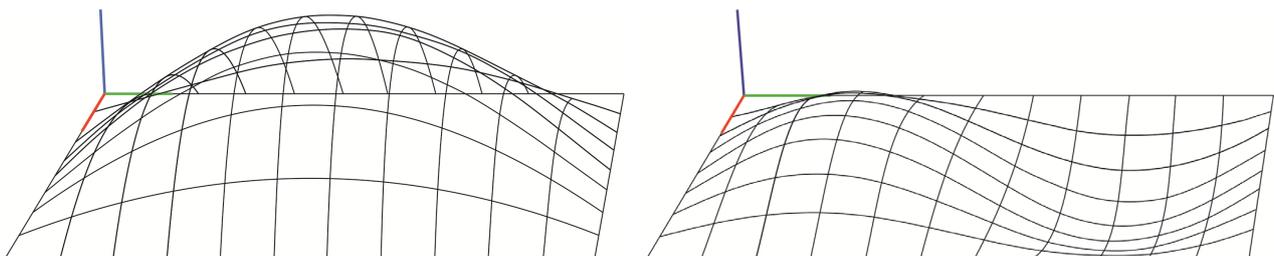


Рис. 2. Форма первых двух мод колебаний прямоугольной пластины при креплении по контуру

Здесь по всем сторонам контура амплитуда прогиба равна нулю и амплитуда колебаний контура будет равна амплитуде внешнего воздействия. Поэтому здесь и приемлема идея размещения виброчувствительных радиоэлементов ближе к краям пластины.

Даже этот простой анализ показывает, что задача размещения радиоэлементов на плате нестационарного РЭС не имеет однозначного решения с точки зрения обеспечения виброустойчивости узла на печатной плате. Кроме того, в реальных конструкциях нестационарные воздействия передаются от корпуса носителя на плату через точки крепления, которые могут быть расположены по контуру в различных вариантах. Колебания от каждой точки крепления распространяются в тело пластины в виде волн, идущих в различных направлениях, и форма динамического изгиба пластины образуется от сложения двух или большего числа волн, распространяющихся по разным направлениям.

Картина изгиба пластины получается достаточно сложной. Но при решении задачи оптимального размещения радиоэлементов на плате информация об изгибных движениях пластины у конструкторов должна быть полной. Получить эту картину динамического изгиба пластины математически можно двумя способами.

Математическая модель

Морз показал [8], что волны любого возможного вида могут быть составлены из подходящей суммы простых волн, что математически означает, любое колебание пластины можно выразить интегралом

$$\omega = \int_0^{2\pi} F_\alpha(x \cos \alpha + y \sin \alpha - ct) dt, \quad (1)$$

где ω – амплитуда прогиба в точке; α – угол наклона направления движения волны к оси x ; c – скорость распространения продольных волн в данной среде; F_α – функция, соответствующая данному колебанию пластины. Гармонические решения управления продольной волны могут быть составлены из суммы волн типа

$$A_\alpha \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (x \cos \alpha + y \sin \alpha - ct) \right],$$

где α принимает различные значения. Эта сумма волн может быть выбрана так, что будет выражать ряд стоячих волн, соответствующих прямоугольным границам пластины. Но решение получается несколько громоздким и сложным.

Другой путь, более прямой, состоит в расщеплении управления продольной волны и подбирается решение, подходящее для прямоугольных границ, в котором используются две системы стоячих волн, имеющих узловые линии (вдоль которых смещение равно нулю), параллельные оси x и оси y .

Фактически этот путь приводит к разложению колебаний по собственным формам свободных колебаний, где фундаментальные функции, выражающие возможные формы пластины, совершающей простые гармонические колебания, будут иметь вид [8]

$$\omega = W \psi_{mn}(x, y) \cos(2\pi f_{mn} t - \varphi),$$

причем

$$\psi_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{\pi n x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi m y}{b}\right),$$

где a и b – стороны прямоугольной пластины.

Форма пластины для первых четырех мод приведена на рис. 3 [8]:

В случае вырождения, когда прямоугольная пластина становится квадратом и допустимые частоты становятся попарно равными $f_{mn} = f_{nm}$, пластина может совершать простое гармоническое колебание с частотой f_{mn} , принимая любую из перечисленных множеств различных форм, соответствующих различным значениям f в комбинации [8]:

$$\psi_{mn} \cos \gamma + \psi_{nm} \sin \gamma,$$

где γ – угол наклона узловой линии к оси x .

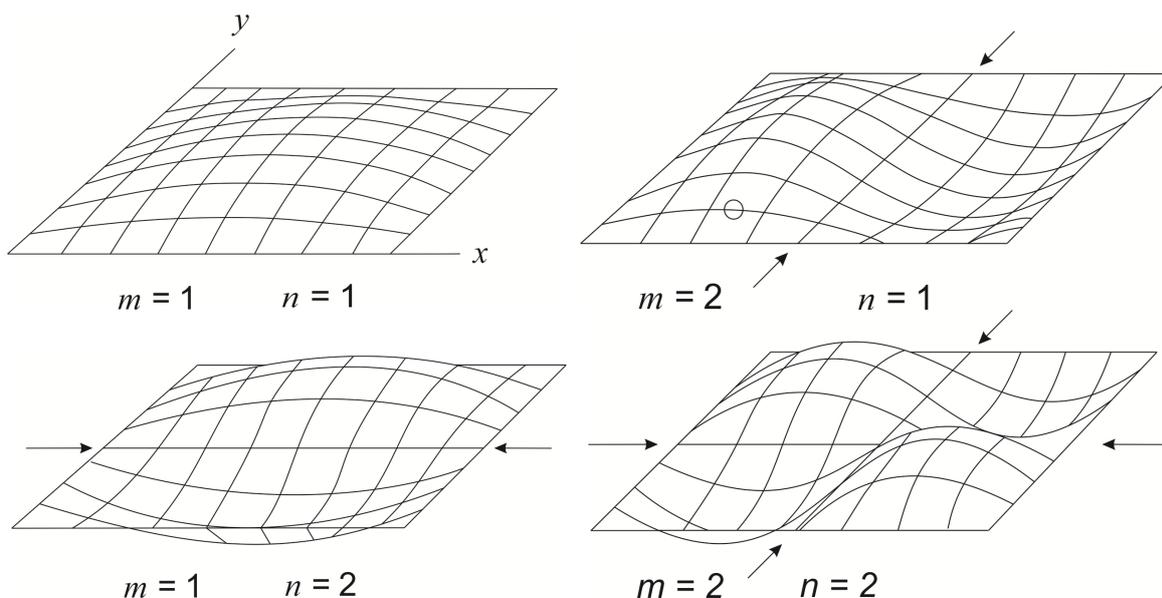


Рис. 3. Форма правых четырех нормальных мод колебания прямоугольной пластины. Стрелками показаны узловые линии

На рис. 4 показаны формы нормальных мод колебаний квадратной пластины, соответствующих f_{12} слева и f_{13} справа для различных значений γ .

Колебания могут принимать форму стоячих волн, которые будут определяться выражением

$$\omega = [\psi_{nm} \cos \gamma + \psi_{nm} \sin \gamma] \cos(2\pi f_{mn} t),$$

а узловые линии имеют различный вид для каждого значения γ . Возможны также бегущие волны, которые определяются выражением

$$\omega = [\psi_{nm} \cos(2\pi f_{mn} t) + \psi_{nm} \sin(2\pi f_{mn} t)].$$

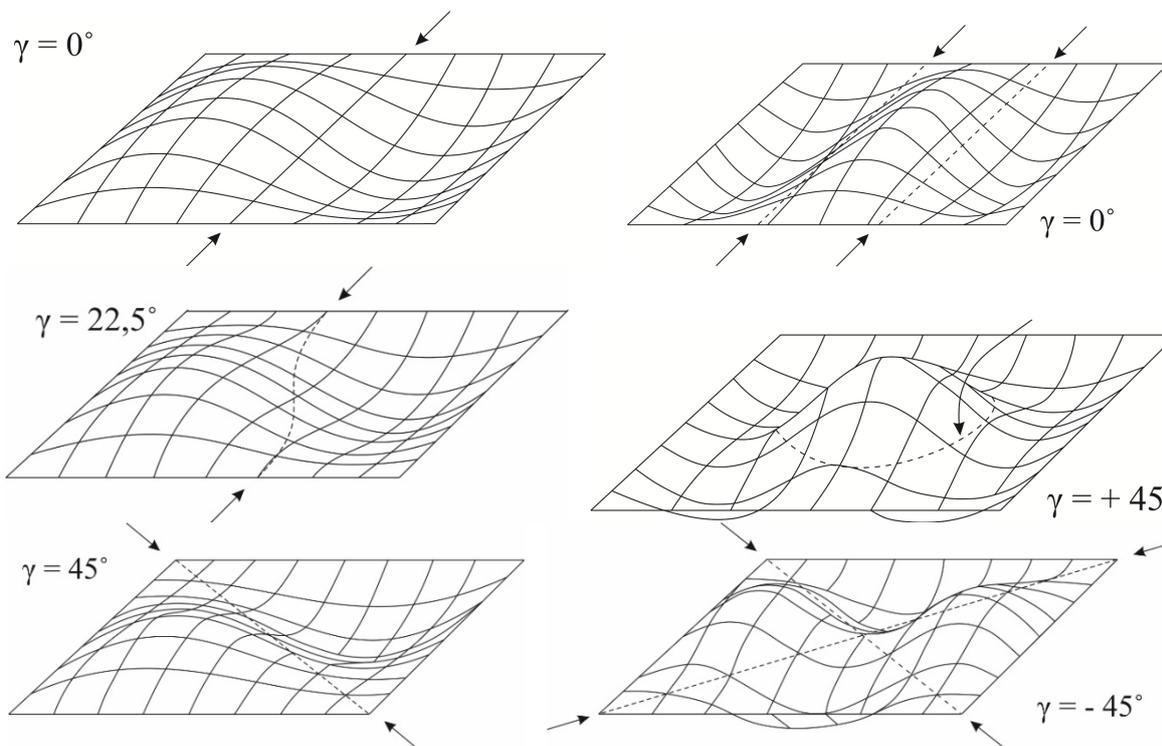


Рис. 4. Различные моды гармонического колебания квадратной пластины для случая выражения $f_{12} = f_{21}$ (слева) и $f_{13} = f_{31}$ (справа). Стрелками показаны узловые линии

В этом случае узловые линии в течение периода последовательно проходят через целый ряд возможных форм.

Только в вырожденном случае возможно, что в пластине конечной величины возникает простое гармоническое движение в форме бегущих волн [8–10].

Все идеи и математика проведенного анализа могут быть использованы при создании имитационных моделей, с помощью которых можно получить информацию о прогибах пластины при ее изгибных колебаниях, особенно в режиме резонанса.

Эксперимент

Исследования показали, что с использованием современных средств измерения вибраций (лазерные датчики, виброметры) можно разрабатывать измерительные установки и получать полную информацию о динамическом изгибе пластины на всех резонансных частотах рабочего диапазона (по ТУ). На кафедре КиПРА ПГУ создан и совершенствуется лабораторный стенд, на котором можно тестировать несущие пластины разрабатываемых узлов на печатных платах. Особенность в том, что воздействия на пластину задаются с четырех мини-вибраторов, расположенных по углам пластины. Это позволяет задавать колебания в фазе во все четыре точки крепления и получать резонансные формы, адекватные нечетным гармоникам; а также задавать колебания в противофазе по противоположным сторонам и получать формы, адекватные четным гармоникам.

Для примера на рис. 5,а показана первая форма по длинной стороне пластины, а на рис. 5,б – по короткой стороне.

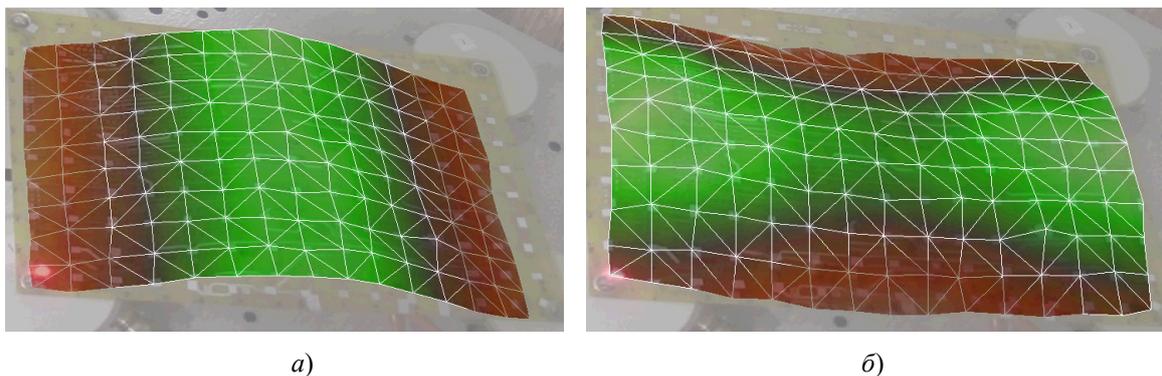


Рис. 5. Первая форма колебаний прямоугольной пластины по длинной (а) и короткой (б) стороне

На рис. 6 показана вторая, третья и четвертая формы колебаний по длинной стороне пластины. Здесь гребни волн почти строго параллельны оси y , а распространение волны идет по оси x .

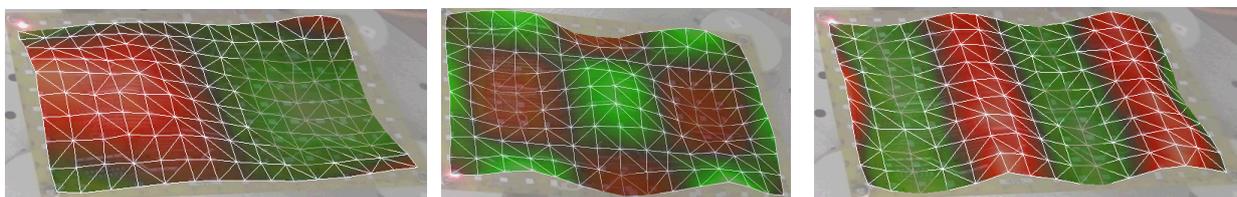


Рис. 6. Вторая, третья и четвертая формы колебаний по длинной стороне пластины

Полученные экспериментально формы колебаний пластины в целом соответствуют нормальным модам колебаний прямоугольной пластины, полученных расчетным путем (см. рис. 3), только в математических формах узловые линии располагаются еще и по краям пластины. Но в целом эти экспериментальные данные можно использовать при решении задачи размещения радиоэлементов на плате.

На этой установке, меняя фазу колебаний (30, 40, 60, 90 град) в одной или нескольких точках, можно получить гармоническое движение в форме бегущей волны для прямоугольной пластины (рис. 7).

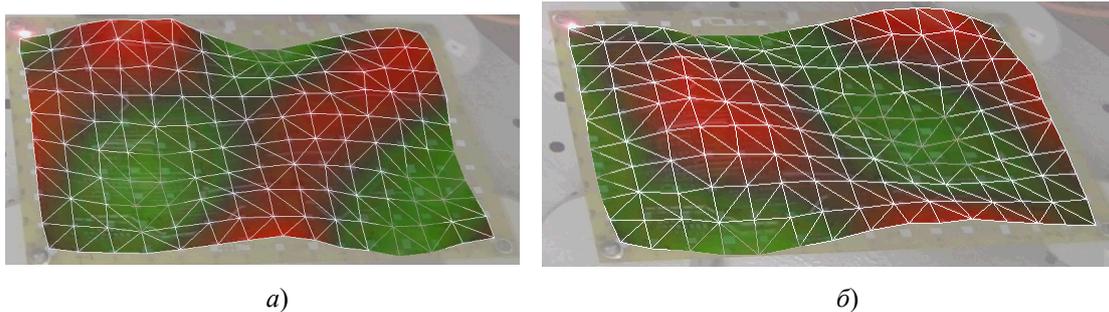


Рис. 7. Форма пластины при распространении бегущей волны на резонансной частоте 535 Гц (а) и на частоте 550 Гц (б)

Применение этого приема дает возможность «угнать» пучность волны на край платы, обеспечив для остальной части пластины минимальную амплитуду прогиба на резонансе.

Таким образом, меняя фазу внешнего воздействия в точках крепления, можно в той или иной степени управлять резонансными колебаниями пластины (рис. 8).

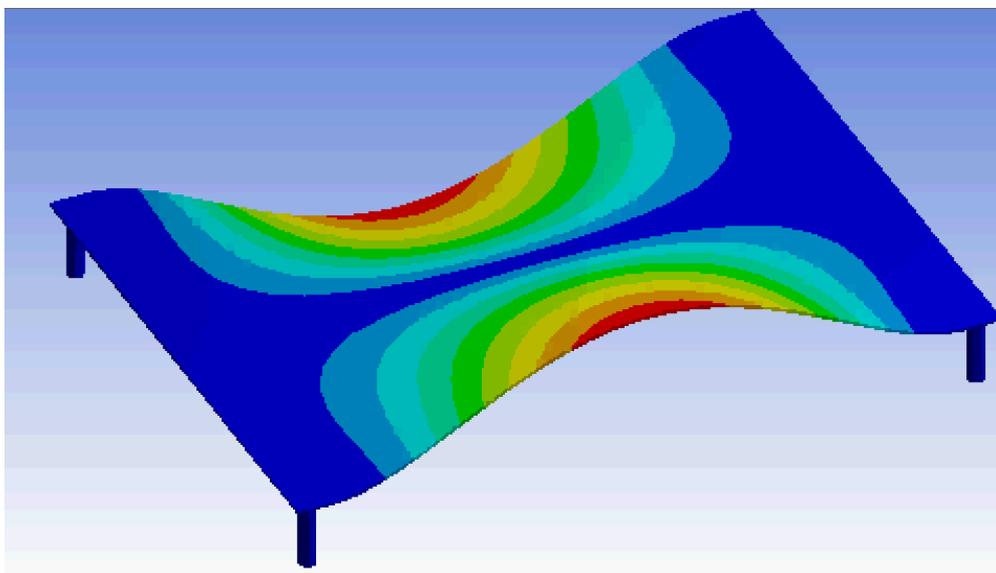


Рис. 8. Фаза внешнего воздействия в точке 1 – 22, в точке 2 – 45, в точке 3, 4 – 90 град. Пучность сдвинута к левому краю пластины

Однако при изменении размеров платы, способа и точек ее закрепления (фиксации), а также при размещении электрорадиоэлементов на плате, их перекомпоновке резонансные частоты изменяются.

Как показали проведенные исследования: изменяются или сдвигаются собственные резонансные частоты, но формы (моды) стоячих и бегущих волн всегда одинаковые, лишь происходит смещение экстремумов амплитуд в плоскости платы.

Для возникновения той или иной формы нужны лишь соответствующие начальные условия:

- частота возбуждающих колебаний,
- синфазное или противофазное возбуждение колебаний,
- соответствующий сдвиг фаз между возбуждающими колебаниями воздействиями,
- разница амплитуд возбуждающих колебаний,
- девиация частоты возбуждающих колебаний.

Заключение

Варьирование перечисленных начальных условий формирует метод адаптивного управления задания возбуждающих колебаний для того, чтобы сформировать максимум амплитуды стоячей или

бегущей волны в требуемом месте платы. В основе метода управления лежит математическая модель типа «черный ящик» с пошаговым управлением изменением начальных условий возбуждения колебаний.

Библиографический список

1. Yurkov, N. K. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates / N. K. Yurkov, G. V. Tankov, A. V. Lysenko, V. A. Trusov // *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016)*. – 2016. – P. 416–418. – DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
2. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Г. Ж. Надырбеков, А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, Н. А. Стрельцов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2017. – Т. 2. – С. 11–13.
3. Головин, П. Д. Применение метода квазиобразцового интервала времени для раздельного измерения параметров параметрических датчиков / П. Д. Головин, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2013. – № 4 (24). – С. 149–157.
4. Григорьев, А. В. Формирование и описание отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2016. – Т. 2. – С. 31–37.
5. Лысенко, А. В. Методика моделирования влияния внешних механических воздействий на динамические параметры РЭА в среде MATHCAD / А. В. Лысенко // *Современные наукоемкие технологии*. – 2014. – № 5-1. – С. 68–69.
6. Горячев, Н. В. Программа инженерного расчёта температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2012. – Т. 2. – С. 242–243.
7. Intellectual method for reliability assessment of radio-electronic means / N. K. Yurkov, A. K. Grishko., A. V. Lysenko, E. A. Danilova, E. A. Kuzina // *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018)*. – 2018. – P. 105–112.
8. Морз, Ф. Колебания и звук : пер. с англ. / Ф. Морз ; под ред. С. Н. Ржевкина. – Москва ; Ленинград : Изд-во техн.-теор. литературы, 1949. – 497 с.
9. Автоматизированная многоканальная виброиспытательная установка / А. В. Лысенко, А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, Д. А. Рындин, Н. К. Юрков // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2012. – № 5. – С. 83–87.
10. Голушко, Д. А. О скорости изменения частоты при проведении испытаний для определения динамических характеристик конструкции / Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2015. – № 4 (26). – С. 147–154.

References

1. Yurkov N. K., Tankov G. V., Lysenko A. V., Trusov V. A. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016)*. 2016, pp. 416–418. DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
2. Nadyrbekov G. Zh., Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Strel'tsov N. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 11–13. [In Russian]
3. Golovin P. D., Lysenko A. V., Yurkov N. K. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High technologies]. 2013, no. 4 (24), pp. 149–157. [In Russian]
4. Grigor'ev A. V., Zatylykin A. V., Lysenko A. V., Tan'kov G. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 31–37. [In Russian]
5. Lysenko A. V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2014, no. 5-1, pp. 68–69. [In Russian]
6. Goryachev N. V., Lysenko A. V., Grab I. D., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2012, vol. 2, pp. 242–243. [In Russian]
7. Yurkov N. K., Grishko A. K., Lysenko A. V., Danilova E. A., Kuzina E. A. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018)*. 2018, pp. 105–112.
8. Morz F. *Kolebaniya i zvuk: per. s angl.* [Vibrations and sound: trans. from English]. Moscow; Leningrad: Izd-vo tekhn.-teor. literatury, 1949, 497 p. [In Russian]

9. Lysenko A. V., Zatytkin A. V., Golushko D. A., Ryndin D. A., Yurkov N. K. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: the results of the past and the problems of the present plus]. 2012, no. 5, pp. 83–87. [In Russian]
10. Golushko D. A., Zatytkin A. V., Lysenko A. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: the results of the past and the problems of the present plus]. 2015, no. 4 (26), pp. 147–154. [In Russian]

Калашников Владимир Сергеевич

преподаватель,
кафедра конструкции и эксплуатации
авиационного радиоэлектронного оборудования,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Таньков Георгий Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: g.tankov43@mail.ru

Трусов Василий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: trusov_v@mail.ru

Реута Никита Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: saparap@mail.ru

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

lecturer,
sub-department of design and operation
of aviation radio-electronic equipment,
Military Institute of the Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
named after T. Ya. Begeldinov
(16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

Lysenko Alexey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Tan'kov Georgiy Vasil'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Trusov Vasilij Anatolievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Reuta Nikita Sergeevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Формирование управляющего сигнала адаптивной информационно-измерительной и управляющей системы вибрационных испытаний / В. С. Калашников, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, Н. С. Реута // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 90–97. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-10.

М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина

ДРЕВОВИДНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ

M. Yu. Mikheev, O. V. Prokof'ev, I. Yu. Semochkina

TREEMAPS TO IMPROVE QUALITY OF SUPPORT OF DECISIONS

Аннотация. В процессе эволюции компьютерных систем поддержки принятия решений (Decision Support System, DSS) «классические» деревья решений были дополнены новыми способами отображения данных – древовидными картами. Используя иерархическую структуру, древовидные карты обеспечивают осмысленно организованные отображения информации большого объема, что дает преимущества при выработке решения по большим данным. Собирая и обобщая опыт применения обычных деревьев и древовидных карт, авторы поставили цель выработать рекомендации по применению средств визуализации данных в прикладных областях, повышающему качество поддержки решений. Если обычный подход нашел эффективное применение в машинном обучении, то древовидные карты ориентированы на применение «вручную» лицами, принимающими решения. В отличие от первого подхода, опирающегося на объективные числовые критерии оценки качества, эффект от применения древовидных карт субъективен и менее очевиден. Для второго подхода применены данные опросов пользователей во время решения профессиональных задач, связанных с анализом веб-страниц «вручную» в процессе полного факторного эксперимента. Среднее время решения задач и экспертные оценки позволили сделать выводы о преимуществах древовидного представления данных и потенциальной возможности повышения качества поддержки принимаемых решений. В заключении статьи обоснован вывод о необходимости комплексного применения средств визуализации данных и ряда других технологий в продуктах второго поколения DSS 2.

Ключевые слова: деревья решений, древовидные карты, качество визуализации, качество решения, экспериментальные данные.

Abstract. In the process of evolution of Decision Support System (DSS) computer systems, the “classic” decision trees were supplemented with new ways of displaying data – tree maps. Using a hierarchical structure, tree maps provide meaningfully organized displays of large amounts of information, which gives advantages in developing solutions for big data. Gathering and summarizing the experience of using ordinary trees and tree maps, the authors set a goal to develop recommendations on the use of data visualization tools in applied areas, which improves the quality of decision support. If the usual approach has found effective application in machine learning, then tree maps are oriented to manual use by decision makers. In contrast to the first approach, which relies on objective numerical criteria for assessing quality, the effect of using tree maps is subjective and less obvious. For the second approach, user survey data were applied during the solution of professional tasks related to the analysis of web pages “manually” in the process of a full factorial experiment. The average time for solving problems and expert estimates allowed us to draw conclusions about the advantages of a tree-like presentation of data and the potential for improving the quality of support for decisions made. In conclusion, the article substantiates the conclusion about the need for the integrated use of data visualization tools and a number of other technologies in the second generation DSS 2 products.

Keywords: decision trees, treemaps, quality of visualization, quality of solution, experimental data.

Введение

Дерево решений используется в системах поддержки принятия решений как карта возможных результатов ряда связанных вариантов. Это позволяет отдельному лицу или организации сопоставлять возможные действия друг с другом на основе их затрат, вероятностей и выгод. Применение деревьев решений в традиционном смысле неоднократно рассматривалось в литературе по построе-

нию DSS [1]. Их можно использовать либо для неформального обсуждения, либо для составления алгоритма, который математически предсказывает лучший выбор [2–9]. Дерево решений обычно начинается с одного узла, который разветвляется на возможные результаты. Каждый из этих результатов приводит к дополнительным узлам, которые переходят в другие возможности, что придает ему древовидную форму. Имея полное дерево решений, можно начать анализ решения в ситуации, с которой столкнулись. Примером современной реализации «классического» подхода являются диаграммы, построенные в среде разработки Lucidchart [10].

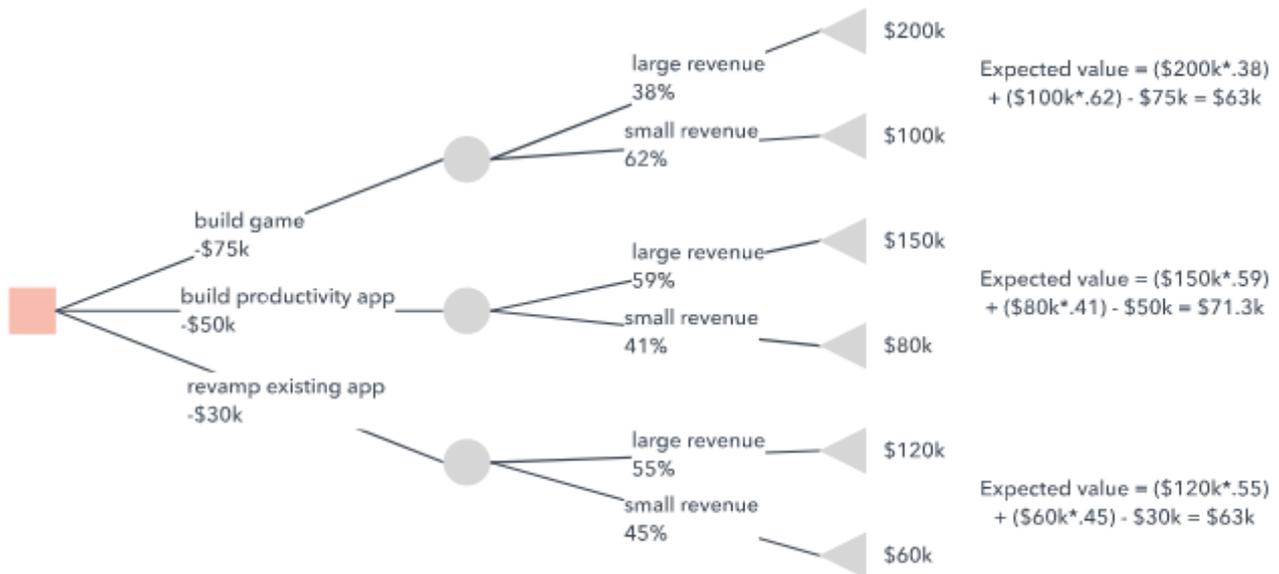


Рис. 1. Пример дерева решений в среде Lucidchart

При определении того, какой результат является наиболее желательным, важно учитывать предпочтения лица, принимающего решения. Например, некоторые могут предпочесть варианты с низким уровнем риска, в то время как другие готовы пойти на риск для большей выгоды. Когда нужно использовать дерево решений с сопутствующей вероятностной моделью, можно применить ее для расчета условной вероятности события или вероятности того, что это произойдет, если произойдет другое событие. Для этого начинают с начального события, затем нужно следовать по пути от этого события к целевому событию, умножая вероятности каждого из этих событий. Таким образом, дерево решений может использоваться как традиционная древовидная диаграмма, которая отображает вероятности определенных событий. Расчет и визуализация в DSS решений с помощью классического вероятностного подхода были только началом для нового этапа, на котором для выработки решений стали применяться неявные данные, полученные в процессе добычи данных, а также данные, выявленные в больших объемах менее информативных данных. Целью работы являлись выявление, систематизация древовидных карт, появившихся в новом поколении продуктов DSS 2 [11], оценка карт в отношении качества визуализации данных для лиц, принимающих решения (ЛПР), выработка рекомендаций по областям применения.

Постановка задачи

Современной разновидностью диаграмм для ЛПР являются древовидные карты, использующие метод визуального представления данных, при котором площадь и цвет прямоугольников представляют две разные метрики. Древовидная карта также может использовать вложенные прямоугольники для представления иерархических отношений. Графическое представление вложенных групп может влиять на понимание пользователями древовидной карты. Существует два распространенных способа представления иерархии в древовидных картах: «простой» подход (рис. 2), который использует плавающий заголовок в центре каждой группы, и подход «заголовки» (рис. 3) использу-

ет отдельный заголовок в прямоугольнике для каждой подгруппы. В обоих случаях при наведении курсора мыши на заголовок группы выделяется граница группы и появляется всплывающая подсказка с общей статистикой группы. Несколько встроенных уровней иерархии приведут к появлению нескольких плавающих заголовков или строк заголовка, что влияет как на видимость, так и на выбор данных. Плавающие заголовки могут скрывать значительную часть нижележащих прямоугольников и другие плавающие заголовки, в то время как подход заголовка использует пространство, которое иначе могло бы показать данные. Количество прямоугольников, представленных в древовидной карте, может влиять на способность пользователей идентифицировать и понять закономерности в данных. Здесь изображены два набора данных различного размера: на рис. 1 показана древовидная карта с 100 ячейками, а на рис. 2 показана одна с 1000 ячейками [12].

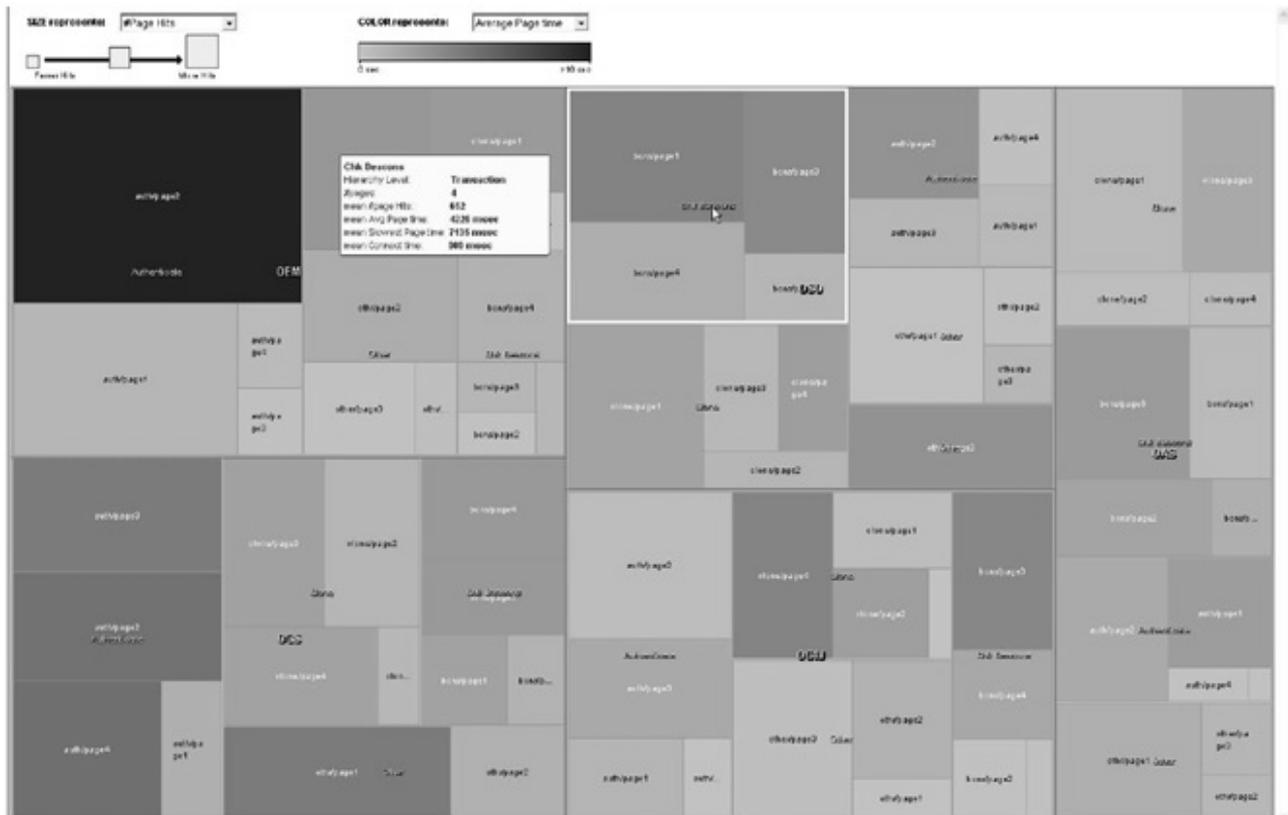


Рис. 2. Карта дерева «простой» иерархии с небольшим набором данных (Treemap-Classic)

По сравнению с таблицами древовидные карты должны обеспечивать лучший общий обзор и более тесную интеграцию между измерениями данных. Это преимущество ожидается в задачах, которые требуют некоторой степени грубого сравнения между прямоугольниками и (или) группами. Когда требуется конкретная идентификация, особенно в небольших таблицах, разумно ожидать одинаковой производительности между древовидной картой и табличными представлениями одних и тех же данных. Большие наборы данных потребуют отнимающей много времени прокрутки в таблицах, но, возможно, могут вызвать большее «затенение» данных в древовидных картах. В общем случае оценка полезности и удобства древовидных карт касается положения узлов в иерархиях, отношений между узлами и группами и идентификации конкретной информации (на основе области, цвета или того и другого). Дополнительные факторы, которые могут повлиять на сложность задач для древовидной карты, включают: сложность идентификации и сравнения; количество уровней иерархии, пройденных в задачах сравнения; потребность использовать площадь, цвет или обе метрики для решения задачи. Из этого следует, что оценка качества визуализации данных и принимаемых по ним решений требует применения методов формирования группы экспертов, построения тестовых наборов данных, сбора и обработки экспертных оценок.

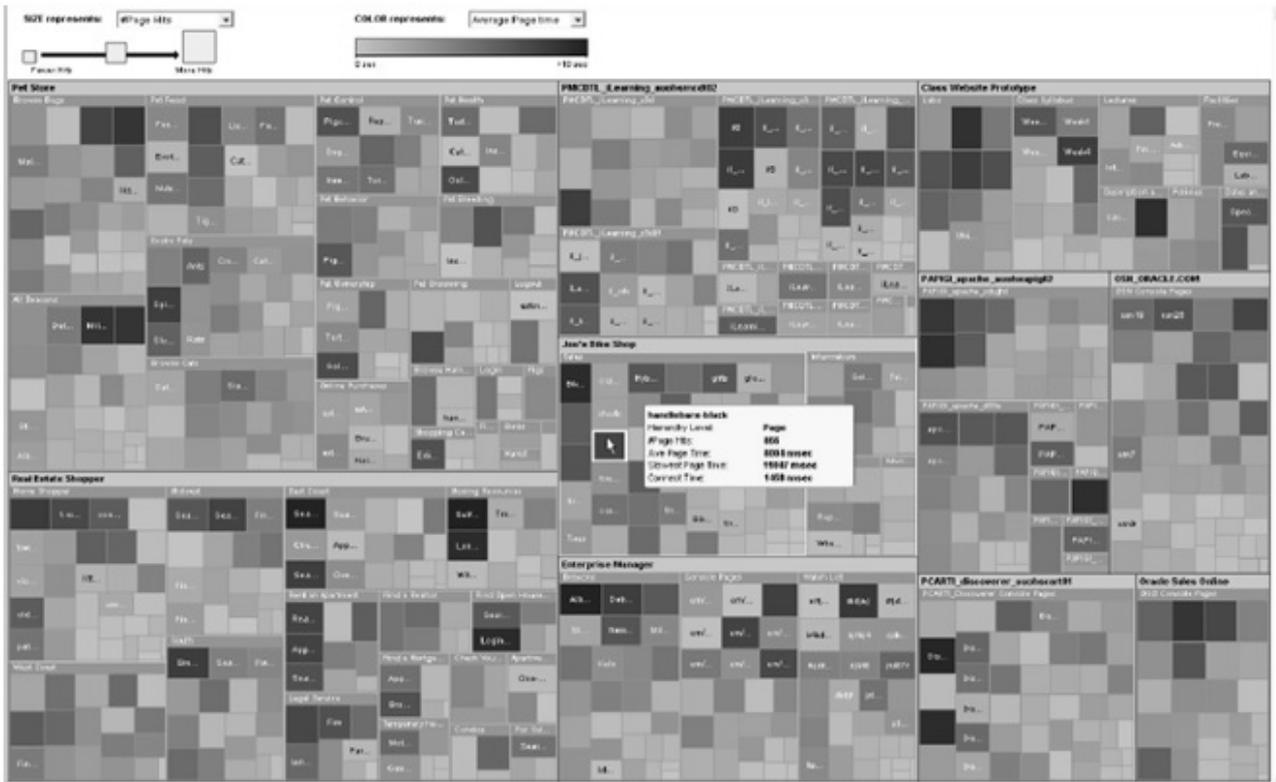


Рис. 3. Карта дерева иерархии «заголовки» с большим набором данных (Treemap-Titlebar)

Эксперименты и обработка результатов

Рассмотрим тестовые данные и организацию эксперимента. Целью экспериментов [12] являлось исследование эффективности и субъективных впечатлений пользователей-ЛПР, использующих древовидные карты и таблицы при идентификации, сравнении и анализе иерархически организованных данных. К управляемым факторам относились древовидная карта и представление данных таблицы, размер набора данных и иерархическое представление древовидной карты (Dataview). Дополнительные факторы включали эффекты обучаемости и эффекты сложности задач. Привлечено 10 экспертов, выдано восемь заданий, в каждом из них имелось шесть условий. Субъективные рейтинговые шкалы были построены после каждого набора из восьми заданий (Task Category), а также проводились собеседования для оценки субъективных впечатлений после выполнения всех заданий. Полный факторный эксперимент использовал факторное пространство 3×2 , соответственно, три способа отображения данных (Treemap-Classic на рис. 1, Treemap-Titlebar на рис. 2, Table) и два различных по размеру набора данных (Large, Small). Восемь задач были заданы для каждого из приведенных выше шести условий (подробности в табл. 1). Они варьировались по сложности от базовых задач идентификации до задач сравнения и анализа. Восемь заданий были представлены в том же порядке в каждом из шести условий, но с разными вопросами. Шесть условий (определяемых представлением данных и размером набора данных) были выровнены по трудоемкости для проведения оценки изучаемости с помощью трех ограничений: каждое условие появлялось примерно одинаковое количество раз, таблицы чередовались с древовидными картами в порядке просмотра, и большие наборы данных перемежались с небольшими наборами данных в порядке просмотра.

Три вида данных включали в себя древовидную карту с классическим представлением иерархии (Treemap-Classic или ТМ-С, рис. 1), древовидную карту с представлением иерархии заголовков (Treemap-Titlebar или ТМ-Т, рис. 2) и несортированную таблицу с иерархией, представленной отступом и цветом заголовка (TABL). Таблицы были отсортированы, чтобы обеспечить базовую линию для сравнения производительности на древовидных картах. Каждый набор данных содержал три уровня иерархии: веб-приложения (например, «Магазин велосипедов Джо»), транзакции (например, «Продажи») и страницы (например, «Педали»). Как древовидные карты, так и таблицы

позволили участникам свободно выбирать из списка две метрики производительности из списка: количество просмотров страницы, среднее время страницы, самое медленное время страницы и время соединения. Они были представлены в двух выпадающих списках как в таблицах, так и в древовидных картах. Результаты эксперимента, выражающие зависимость среднего времени работы над задачей от значений факторов эксперимента, представлены на рис. 4,а–в, рейтинговые оценки способов визуализации данных по критериям качества показаны на рис. 4,г.

Таблица 1

Категории задач и примеры

Задачи	Тип задачи	Типичные примеры
1, 2, 5	Идентификация или подсчет (Ident)	Каково было среднее время на странице при аренде квартиры
3, 4	Сравнение, используя один или несколько критериев (Compare)	Какие страницы имели самое медленное среднее время страницы и наименьшее количество хитов?
7	Расширенное сравнение (Compare2)	Какая транзакция содержала больше всего страниц, которые имеют более 900 просмотров страниц?
6, 8	Открытый анализ (Analysis)	Основываясь только на данных перед вами, каковы (если таковые определяются) отношения между временем страницы-хита и средним временем просмотра страницы?

Дисперсионный анализ времени завершения задачи включал условия для каждого способа представления данных (ТМ-Т, ТМ-С, Табл), номера задачи, порядка просмотра (Viewing Order) и размера набора данных (Dataset). Визуальное представление данных сильно повлияло на время выполнения задачи: задачи ТМ-Т выполнялись на 30 % быстрее (78 с), чем представления ТМ-С (108 с) или ТАБЛ (111 с) (критерий Фишера $F = 12$, уровень значимости $p < 0,001$). Увеличение времени завершения от малого к большому набору данных для представления ТАБЛ было значительно длиннее аналогичного древовидного (рис. 4,а).

Существенные различия во времени выполнения были обнаружены между восемью задачами в условии ($F = 16,5$, $p < 0,001$). Как показано на рис. 4,б, формат ТМ-Т имел явное преимущество во всех этих категориях задач, сгруппированных в три категории: идентификация значений или подсчет листовых узлов (задачи 1, 2, 5); сравнение по всем наборам данных и более открытый анализ, объединяющий два критерия (задачи 3, 4, 6, 8); специальная задача сравнения, требующая сложного сравнения групп на основе критериев более низкого уровня (задача 7).

Схема уравнивания позволила оценить доступность древовидных карт для изучения. Порядок просмотра значительно повлиял на время выполнения задачи (рис. 4,в, где $F = 8,3$, $p < 0,001$), при этом первое ознакомление с данными участников (153 с) значительно медленнее, чем второе (121 с), которое было значительно медленнее, чем остальные представления (73–86 с). В трех представлениях данных асимптотическая производительность обычно достигалась на третьем или четвертом наборе данных. В целом восприятие таблицы и двух древовидных карт были приблизительно одинаковыми, хотя у нескольких экспертов возникли некоторые трудности с интерпретацией ТМ-С в первой позиции просмотра.

Всего было выполнено 14 подсказок и 40 ошибок в 480 завершённых испытаниях (10 участников \times 6 просмотров \times 8 задач). Помощь предоставлялась либо для предотвращения выполнения участником действия, которое препятствовало бы завершению задачи, либо для исправления неверного восприятия участником, которое препятствовало бы завершению задачи. Подсказки были равномерно распределены по представлениям данных и задачам, но 86 % подсказок потребовались, когда участники использовали больший набор данных. Ошибки были в равной степени распределены по трем способам представления данных, причем большинство возникало в задачах 7 и 3 (57 % и 25 % ошибок соответственно). Две трети ошибок в этих двух задачах возникли при использовании большего набора данных. Это были также две самые медленные задачи, подтверждающие сложность проведения сравнений между уровнями иерархии.

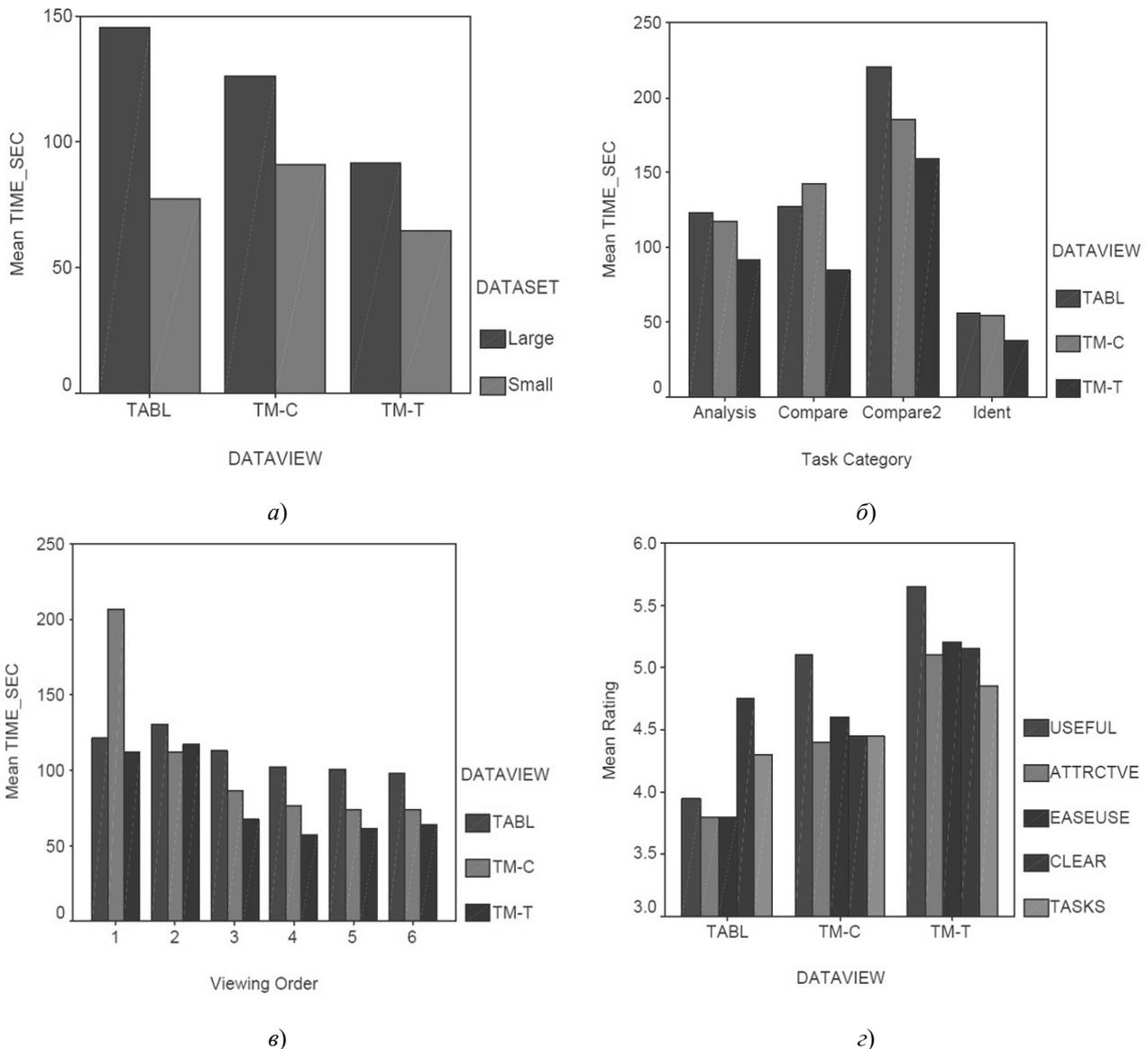


Рис. 4. Результаты экспериментов:

- a* – время выполнения задачи, представление данных и размер набора данных;
- б* – время выполнения задач по категориям задач и видам представления данных;
- в* – время выполнения задачи в порядке просмотра и представления данных;
- з* – средний рейтинг пользователей по данным в диапазоне 1–7

Выполнив восемь заданий в каждом условии, участники заполнили пять 7-балльных рейтинговых шкал, касающихся их опыта с этим условием. В каждом случае оценка 1 была отрицательной (например, «совсем не полезно» или «очень сложно»), тогда как оценка 7 была положительной (например, «очень полезна» или «очень проста»). Средние оценки по конкретным вопросам и видам представления данных показаны на рис. 4,з. Вопросы «насколько это было привлекательно?» и «насколько легко это было использовать?» дали очень похожие результаты, с общими оценками для TM-T (в среднем 5,2) выше, чем для TM-C (4,6), что в свою очередь было выше, чем представление TABL (3,8). При оценке «Насколько это было полезно?» респонденты считали, что две древовидные карты (5,1–5,6) намного превосходят таблицу (3,9). Вопрос «Насколько ясным и понятным это было?» произвел аналогичные оценки для трех представлений данных, с 4,5–5,0. На вопрос «Как бы вы оценили вашу способность выполнять сегодняшние задачи?» TABL и TM-C были очень похожи (4,4) и были умеренно ниже, чем для TM-T (4,8).

Оценка качества поддержки решений

Это исследование показало, что пользователи (системные администраторы и сетевые администраторы, привлеченные в качестве экспертов) быстро изучают древовидные карты, которые потенциально превосходят табличные представления для задач идентификации, сравнения и анализа. Формат иерархии заголовков ТМ-Т для древовидных карт был предпочтительнее формата ТМ-С, который может скрыть основную информацию. Преимущество во времени и в субъективных предпочтениях для древовидных карт заметно как для небольших, так и для больших наборов данных.

Большинство решений для визуализации информации, включая древовидные карты, требуют времени для ознакомления и изучения, прежде чем пользователи смогут эффективно использовать их для решения проблем. Неподготовленные участники проходили обучение в первых опытах, независимо от того, обеспечивали ли представление данных древовидную карту или таблицу. Наиболее быстрое изучение было выявлено по среднему времени завершения в случаях древовидной карты. Следовательно, древовидные карты могут быть быстро изучены теми, кто совершенно не знаком с этой концепцией, и это обучение происходит довольно быстро. Включение четких условных обозначений для размера и цвета, а также обширная информация о подсказках для перемещаемых элементов добавили возможность изучения древовидной карты.

Четыре категории задач были включены в экспериментальные задачи этого исследования. Задачи идентификации были выполнены наиболее быстро при всех трех представлениях данных. Задачи сравнения и открытого анализа выполнялись медленнее, но по времени были похожи друг на друга. Задачи расширенного сравнения на уровне страниц были выполнены медленнее всех из трех представлений данных. Представление ТМ-Т превосходило по времени завершения оба других представления в каждой из этих категорий, в то время как ТМ-С и ТАВЛ обеспечивали аналогичную производительность пользователя в целом. Более высокая производительность ТМ-Т также была отражена в рейтингах пользователей, которым было проще пользоваться, они более привлекательны и понятнее, чем другие представления данных.

Производительность по задачам идентификации была намного более похожа между тремя представлениями данных, чем у более сложных задач сравнения. В задачах идентификации участники либо просматривали строки и заголовки в таблице, либо читали информацию всплывающей подсказки в древовидных картах. Основные различия в производительности задач здесь заключались в том, что: древовидные карты содержали данные, видимые без какой-либо прокрутки; участникам часто приходилось прокручивать верхнюю часть таблицы, чтобы определить свои параметры метрики столбца. Представления древовидной карты позволили проводить более точные сравнения между страницами и группами.

Однако ошибки все еще были очевидны, потому что: некоторые пользователи древовидной карты оценивали размер групп по количеству содержащихся прямоугольников, а не по метрике, которая была отображена в области прямоугольника. Таким образом, области группы (веб-приложения и транзакции) отражают количество прямоугольников, а не выбранную метрику. Другая ошибка: пользователи не всегда искали данные до самых краев древовидной карты, пропуская некоторые важные данные.

Различная плотность данных в древовидных картах с большим и малым количеством данных влияла на полезное поле зрения участников (Useful field of view, UFOV), т.е. на круговую область, в которой указано, из какого источника извлекается информация. UFOV может быть оценен по расстоянию между двумя последовательными фиксациями глаза в задаче поиска; эти расстояния фиксации уменьшаются с увеличением визуальной плотности фоновой информации. Следовательно, более плотные древовидные карты, вероятно, вызывают меньшее UFOV и требуют большего количества фиксаций, что в свою очередь может привести к большему количеству пропущенной информации. Представление ТМ-Т превосходило как по объективной производительности, так и по субъективным предпочтениям представление ТМ-С. Это произошло, несмотря на то, что для формата ТМ-Т была зарезервирована область экрана для имен групп в заголовках, оставляя меньше места для отображения данных конечного узла. В представлении ТМ-С участники не всегда замечали, что шрифты для заголовков транзакций были меньше, чем для заголовка веб-приложения, что могло привести к увеличению количества ошибок и времени выполнения.

Потенциальная возможность дальнейшего развития древовидных карт выявлена в ходе высказывания предложений пользователей, участвовавших в эксперименте. Многие участники предложи-

ли дополнительные функции древовидной карты, чтобы помочь в их задачах мониторинга сети. Определяемый пользователем порог, после которого конечные узлы станут красными, позволит им более легко отслеживать проблемные сетевые объекты. Автоматическое обновление, генерируемое системой, требуется через определенные администратором интервалы, например, каждые 30 мин. Фильтрация по одной или нескольким конкретным метрикам позволит быстро анализировать проблемы. Некоторым также требуется предоставление исторического представления метрики данных, чтобы лучше диагностировать проблемы. Некоторые участники также отметили, что непрерывная цветовая шкала не нужна, поскольку дискретных значений цвета достаточно для большинства задач мониторинга и диагностики.

Древовидные карты превосходили несортированные представления таблиц в задачах идентификации, сравнения и анализа в этом исследовании. Это преимущество возросло, когда две метрики информации должны были быть объединены, и это дает возможность обнаруживать тенденции. Здесь представление иерархии заголовков превосходило классическое представление с плавающим заголовком из-за меньшего количества затуманивания и путаницы, но особые проблемы дизайна, такие как шрифты и цвета, имеют решающее значение при визуализации данных.

Обсуждение и рекомендации

Эволюция методов визуализации иерархических данных привела к созданию новых способов их отображения, которые могут одновременно применяться с известными способами, взаимно дополняя друг друга.

Рассмотрим преимущества и недостатки «обычных» деревьев решений в аналитике. Деревья решений остаются популярными, так как их легко воспринимать, а также и по другим причинам:

- они могут быть полезны с точными данными или без точных данных, а также любые данные требуют минимальной подготовки;
- новые опции могут быть добавлены к существующим деревьям;
- их ценность в выборе лучшего из нескольких вариантов;
- они легко сочетаются с другими инструментами принятия решений.

Однако деревья решений могут стать чрезмерно сложными. В таких случаях более компактная диаграмма влияния может быть хорошей альтернативой. Диаграммы влияния сужают акцент на критические решения, исходные данные и цели. Деревья решений играют существенную роль в машинном обучении и интеллектуальном анализе данных. Дерево решений также можно использовать для создания автоматизированных прогностических моделей, в которых используются приложения для машинного обучения, интеллектуального анализа данных и статистики. Этот метод, известный как изучение дерева решений, учитывает наблюдения в отношении элемента, чтобы определить его ценность.

Когда узлы представляют данные, а не решения, этот тип дерева используют как дерево классификации. Каждая ветвь содержит набор атрибутов или правил классификации, которые связаны с определенной меткой класса, которая находится в конце ветки. Эти правила, также известные как правила принятия решений, могут быть выражены в предложении *if-then*. Каждый дополнительный набор данных помогает модели более точно предсказать, какому из конечного набора значений принадлежит рассматриваемый объект. Затем эту информацию можно использовать в качестве входных данных в более широкой модели принятия решений. Иногда прогнозируемой переменной будет действительное число, например, цена. Деревья решений с непрерывными, вещественными результатами называются деревьями регрессии.

Для повышения точности иногда несколько деревьев используются вместе в методах ансамбля:

- создание пакетов предполагает получение нескольких деревьев путем повторной выборки исходных данных, после чего эти деревья используют для достижения консенсуса;
- классификатор случайного леса состоит из нескольких деревьев, предназначенных для увеличения скорости классификации;
- повышенные деревья, которые можно использовать для деревьев регрессии и классификации;
- все деревья в лесу вращения обучаются с использованием метода главных компонент на случайной части данных.

Дерево решений считается оптимальным, когда оно представляет наибольшее количество данных с наименьшим количеством уровней или вопросов. Алгоритмы, предназначенные для созда-

ния оптимизированных деревьев решений, включают CART, ASSISTANT, CLS и ID3/4/5. Дерево решений также можно создать, создав правила ассоциации, поместив целевую переменную справа. В каждом методе нужно определить, где лучше сделать разделение и на каком уровне. Обычные методы для этого включают применение коэффициента Джини, извлечение информации и уменьшение дисперсии. Использование деревьев решений в машинном обучении имеет несколько преимуществ:

- стоимость использования дерева для прогнозирования данных уменьшается с каждой дополнительной точкой данных;
- работает для категориальных или числовых данных;
- может моделировать проблемы с несколькими выходами;
- использует модель белого ящика (облегчая объяснение результатов) ;
- надежность дерева может быть проверена и определена количественно;
- имеет тенденцию быть точным независимо от того, нарушает ли оно допущения исходных данных.

Но у них также есть несколько недостатков:

- при работе с категориальными данными с несколькими уровнями прирост информации смещается в пользу атрибутов с наибольшим количеством уровней;
- расчеты могут стать сложными при работе с неопределенностью и множеством связанных результатов.

В появившихся исторически позднее древовидных картах отсутствует ввод вероятности сценария (выбора ветви) как первичное данное, но зато по размеру и цвету прямоугольника группы исходных данных можно получить наглядное представление об этой величине. Древовидные карты могут предоставлять существенные преимущества по сравнению с табличными данными в корпоративных приложениях благодаря присущей им способности поддерживать интеграцию пользователями разных измерений информации. Представления иерархии древовидных карт значительно различались по поддержке задач идентификации, сравнения и анализа, но были значительно быстрее и точнее, чем представления табличных данных. Изучение древовидной карты было, по крайней мере, таким же успешным, как и для таблиц. Различия в производительности между древовидными картами и таблицами увеличиваются с увеличением размера наборов данных. Субъективные оценки пользователей в подавляющем большинстве случаев поддерживали древовидные карты в табличных представлениях данных. Эти результаты показывают, что древовидные карты должны быть включены в качестве стандартного графического компонента в приложения для анализа и мониторинга данных на уровне предприятия.

Заключение

Тенденции развития древовидных карт являются частью общего процесса развития систем поддержки принятия решений и достижения в этой области требуют комплексного изучения. Например, сейчас искусственный интеллект позволил людям принимать лучшие решения с помощью интеллектуальных DSS. Новые исследования, регулярно публикуемые по результатам конференций IFIP TC8 / Working Group 8.3 [11], показывают, что лица, принимающие решения, могут действовать более своевременно, используя данные в режиме реального времени, более точно благодаря интеллектуальному анализу данных и методам «больших данных», более стратегически, учитывая большее количество факторов, более инклюзивно, благодаря доступности данных социальных сетей и более широкий доступ к средствам массовой информации с помощью медиатехнологий. Начиная с 2014 г. [13] встречаются утверждения о рождении нового поколения технологий, которому присвоено название DSS2.0.

В рамках общего направления исследований формулируемые темы включают теоретические, эмпирические и проектные исследования; тематические подходы в системах поддержки принятия решений; модели принятия решений в реальном мире; информационные технологии в здравоохранении; теорию принятия решений; управление знаниями; открытие знаний и ресурсов; бизнес-аналитику; системы поддержки принятия групповых решений; «большие данные»; специальные языки для поддержки принятия решений; мультимедийные инструменты для DSS; системы Web 2.0 в поддержке принятия решений и контекстные технологии для принятия решений; интеллектуальные системы и технологии поддержки принятия решений; методы исследования в DSS 2.0; мобильные DSS; аналитику социальных сетей. Для всех, кто разрабатывает или использует системы под-

держки принятия решений, перечисленный список методов и приложений должен дать идеи и указания для вывода собственных разработок на новый технологический уровень.

Библиографический список

1. Power, D. J. Decision Support, Analytics, and Business Intelligence / D. J. Power and Ciara Heavin. – Third ed. – New York : Business Expert Press, 2017. – P. 196.
2. Белозерцев, А. И. Методы анализа данных и их реализация в системах поддержки принятия решений. Аспекты инжиниринга информационно-измерительных систем : учеб. пособие / А. И. Белозерцев, М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2018. – 148 с.
3. Прокофьев, О. В. Методы и средства поддержки принятия решений в социально-экономических задачах / О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2010. – 100 с.
4. Долгова, И. А. Компьютерная поддержка принятия решений для управления социально-экономическими системами / И. А. Долгова, О. В. Прокофьев. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2012. – 116 с.
5. Михеев, М. Ю. Методы анализа данных и их реализация в системах поддержки принятия решений : учеб. пособие / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2014. – 118 с.
6. Прокофьев, О. В. Концепция и способы построения систем поддержки принятия решений на основе интеллектуального анализа данных / О. В. Прокофьев // Системы интеллектуального анализа данных: методология, реализация, приложения. – Пенза : АННОО ПДЗ, 2013. – С. 22–40.
7. Тюрин, М. В. Разработка моделей прогнозирования состояния элементов технически сложного объекта / М. В. Тюрин, С. А. Фомин, О. В. Прокофьев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 73–78.
8. Николаев, А. В. Большие данные для нового качественного уровня электроэнергетики / А. В. Николаев, О. В. Прокофьев, М. В. Тюрин, А. Н. Токарев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 102–104.
9. Михеев, М. Ю. Прогнозирование литеральных ситуаций по коротким временным рядам / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 320–324.
10. What is a decision tree? – URL: <https://www.lucidchart.com/pages/decision-tree>
11. Phillips-Wren, G. E. DSS 2.0 – Supporting Decision Making With New Technologies / G. E. Phillips-Wren, S. Carlsson, A. Respcio. – IOS Press, 2014. – P. 604.
12. Goldberg, J. H. Enterprise Network Monitoring Using Treemaps / J. H. Goldberg, J. Helfman // Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting : proceedings. – 2005, September. – P. 671–675. – DOI 10.1177/154193120504900508.
13. International Federation For Information Processing. Technical Committee 8. Working Group 8.3. – URL: <http://ifiptc8.dsi.uminho.pt/index.php/events?wg=8.3>

References

1. Power D. J., Heavin C. *Decision Support, Analytics, and Business Intelligence*. Third ed. New York: Business Expert Press, 2017, p. 196.
2. Belozertsev A. I., Mikheev M. Yu., Prokofev O. V., Semochkina I. Yu. *Metody analiza dannykh i ikh realizatsiya v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy. Aspekty inzhiniringa informatsionno-izmeritel'nykh sistem: ucheb. posobie* [Methods of data analysis and their implementation in decision support systems. Aspects of engineering of information and measurement systems: textbook]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2018, 148 p. [In Russian]
3. Prokofev O. V., Semochkina I. Yu. *Metody i sredstva podderzhki prinyatiya resheniy v sotsial'no-ekonomicheskikh zadachakh* [Methods and means of decision support in socio-economic problems]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2010, 100 p. [In Russian]
4. Dolgova I. A., Prokofev O. V. *Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy dlya upravleniya sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami* [Computer-based decision support for managing socio-economic systems]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2012, 116 p. [In Russian]
5. Mikheev M. Yu., Prokofev O. V., Semochkina I. Yu. *Metody analiza dannykh i ikh realizatsiya v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy: ucheb. posobie* [Methods of data analysis and their implementation in decision support systems: textbook]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2014, 118 p. [In Russian]
6. Prokofev O. V. *Sistemy intellektual'nogo analiza dannykh: metodologiya, realizatsiya, prilozheniya* [Data mining systems: methodology, implementation, applications]. Penza: ANNOO PDZ, 2013, pp. 22–40. [In Russian]
7. Tyurin M. V., Fomin S. A., Prokofev O. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 73–78. [In Russian]

8. Nikolaev A. V., Prokofev O. V., Tyurin M. V., Tokarev A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 102–104. [In Russian]
9. Mikheev M. Yu., Prokofev O. V., Savochkin A. E. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 1, pp. 320–324. [In Russian]
10. *What is a decision tree?* Available at: <https://www.lucidchart.com/pages/decision-tree>
11. Phillips-Wren G. E., Carlsson S., Respcio A. *DSS 2.0 – Supporting Decision Making With New Technologies*. IOS Press, 2014, p. 604.
12. Goldberg J. H., Helfman J. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting: proceedings*. 2005, September, pp. 671–675. DOI 10.1177/154193120504900508.
13. *International Federation For Information Processing. Technical Committee 8. Working Group 8.3*. Available at: <http://ifiptc8.dsi.uminho.pt/index.php/events?wg=8.3>

Михеев Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: mix1959@gmail.com

Прокофьев Олег Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математики и информатики,
Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации
(Пензенский филиал)
(Россия, г. Пенза, ул. Калинина, д. 33 б)
Email: prokof_ow@mail.ru.

Семочкина Ирина Юриевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ius1961@gmail.com

Mikheev Mikhail Yuriyevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of informational technologies
and systems,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baydukov/Gagarin street, Penza, Russia)

Prokofev Oleg Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of mathematics and computer science,
Financial University under the Government
of the Russian Federation (Penza branch)
(33 b Kalinina street, Penza, Russia)

Semochkina Irina Yurievna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baydukov/Gagarin street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Михеев, М. Ю. Древоподобные карты для повышения качества поддержки решений / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 98–108. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-11.

А. С. Ильин, Р. Ф. Плаксунов, А. П. Воронов, И. А. Кострикина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ УПК-30ПТ

A. S. Ilin, R. F. Plaksunov, A. P. Voronov, I. A. Kostrikina

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OPERATING MODES ON THE MEASUREMENT ACCURACY OF THE INSTALLATION FOR CALIBRATION OF KILOVOLT METERS UPK-30 PT

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность исследования режимов работы установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ определяется необходимостью достижения высокой точности измерений при использовании нестабильных компонентов. Предметом исследования является влияние параметров входного сигнала на погрешность измерения. Целью работы является определение диапазона временных интервалов работы установки, не влияющего на заданную погрешность измерения. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи рассматривался непрерывный и прерывистый способ воспроизведения сигнала. *Результаты.* В ходе работы установлено влияние различных режимов работы на точность измерений в установке для поверки киловольтметров УПК-30ПТ. В результате исследования выбран прерывистый режим, обеспечивающий меньшую погрешность измерения. Определен диапазон временных интервалов, в котором должно работать поверяемое устройство, по заданной погрешности. *Выводы.* Выбор режима работы установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ оказывает существенное влияние на достижение высокой точности измерений при использовании менее стабильных компонентов.

Ключевые слова: поверка, высокое напряжение, измерительная система, погрешность измерения, измерительные каналы, режим работы.

Abstract. *Background.* The relevance of the study of the operating modes of the unit for checking kilovoltmeters UPK-30PT is determined by the need to achieve high measurement accuracy when using less stable components. The subject of research is the influence of input signal parameters on the measurement error. The purpose of this work is to determine the range of time intervals of the installation that does not affect the specified measurement error. *Materials and methods.* To solve this problem, we considered a continuous and intermittent method of signal reproduction. *Results.* In the course of the work, the influence of various operating modes on the accuracy of measurements in the unit for checking kilovoltmeters UPK-30PT was established. As a result of the study, an intermittent mode was selected, which provides a lower measurement error. The range of time intervals in which the device to be tested should operate is determined based on the specified error. *Conclusions.* The choice of the operating mode of the unit for checking kilovoltmeters UPK-30PT has a significant impact on achieving high measurement accuracy when using less stable components.

Keywords: verification, high voltage, measuring system, measurement accuracy, measuring channel, operating mode.

Задача разработки и изготовления установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ, предназначенных для воспроизведений и измерений напряжений постоянного тока до 30 кВ с пределом допускаемой погрешности $\pm 0,1\%$, привела к необходимости исследования влияния параметров входного сигнала установки на погрешность измерения [1–3].

Установка представляет трехканальную систему измерения под управлением персонального компьютера (ПК):

- канал 1 (источник высокого напряжения) воспроизводит высокое напряжение, задаваемое ПК;
- канал 2 (эталонный киловольтметр) преобразует воспроизводимое напряжение до уровня, измеряемого эталонным вольтметром, и передает результаты измерений на ПК;
- канал 3 (поверяемый киловольтметр) преобразует воспроизводимое напряжение до уровня, измеряемого поверяемым вольтметром, и передает результаты измерений на ПК;

– ПК формирует временной процесс работы системы и обрабатывает полученные по каналам 1 и 2 данные.

Измерения в каналах 2 и 3 производятся одновременно. Результаты измерений ПК сравнивают друг с другом. Разница между результатами измерений определяет погрешность поверяемого устройства [4, 5].

Структурная схема измерительной системы изображена на рис. 1.

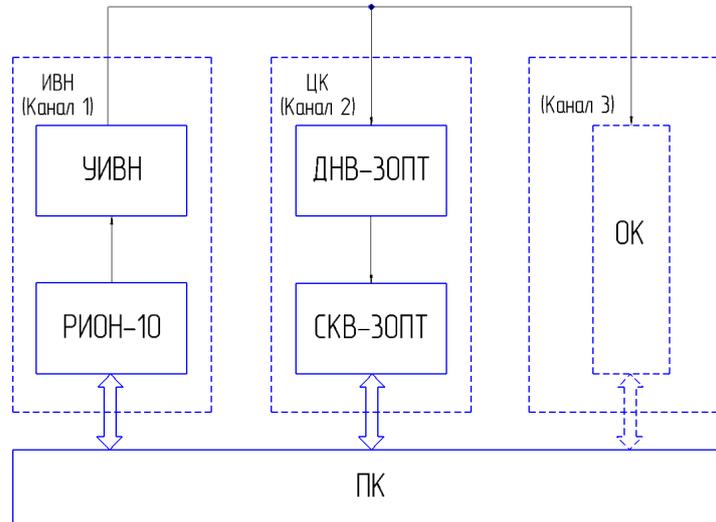


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы: ИВН – источник высокого напряжения; УИВН – управляемый источник высокого напряжения; РИОН-10 – регулируемый источник опорного напряжения; ЦК – образцовый цифровой киловольтметр; ДНВ-30ПТ – делитель напряжения высоковольтный; СКВ-30ПТ – блок измерительный киловольтметра постоянного тока; ОК – объект контроля (поверяемый киловольтметр); ПК – персональный компьютер

Измерительные каналы 2 и 3 подвергались воздействию воспроизводимого каналом 1 напряжения постоянного (непрерывный режим) и импульсного (прерывистый режим) токов. Форма воспроизводимых напряжений, длительность воздействия напряжений на каналы 2 и 3 выбраны из условий обеспечения безопасности работы оператора в верхней точке рабочего диапазона напряжений (U_1) в течение заданного времени непрерывной работы ($T_{вр}$), соответствия методики поверки киловольтметра В7-40 в части установки значений напряжения в поверяемых точках и оптимальности периода повторения измерений (T) приведены на рис. 2.

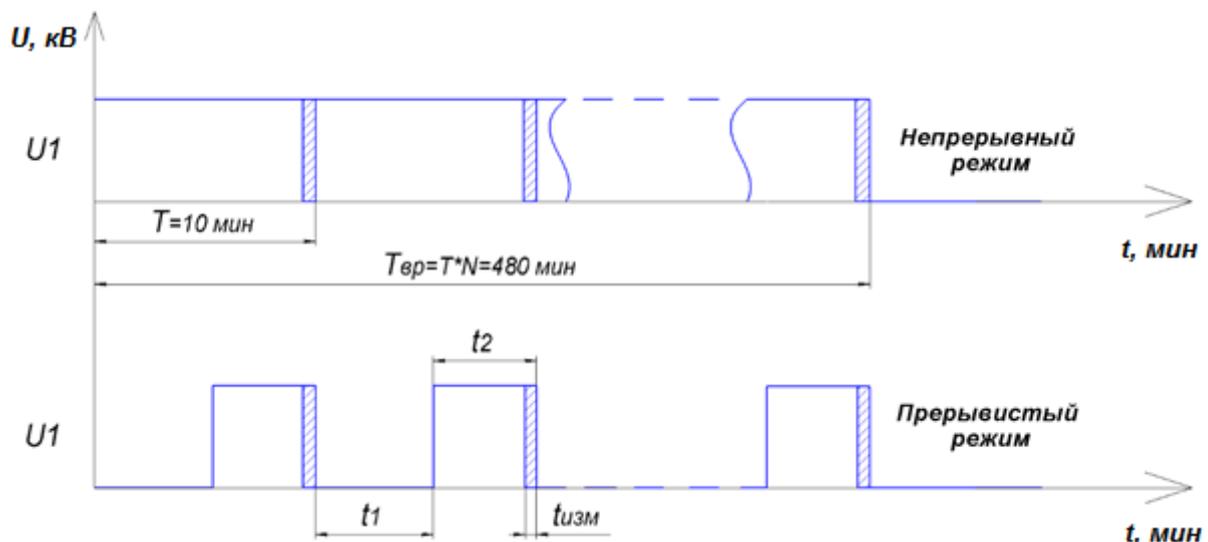


Рис. 2. Временной процесс работы системы:
 t_1 – время до подачи напряжения; t_2 – время выдержки под напряжением; $t_{изм}$ – время измерения

Период повторения измерений в непрерывном режиме соответствует периоду повторения измерений в прерывистом режиме и равен

$$T = t_1 + t_2, \quad (1)$$

где t_1 – до подачи напряжения на входы киловольтметров; t_2 – время выдержки киловольтметров под напряжением.

Следует отметить, что время выдержки киловольтметров под напряжением t_2 намного больше времени измерений $t_{\text{изм}}$, которое включает время непосредственного измерения (1 с) и время нахождения киловольтметра под напряжением после завершения процесса измерения (0,5 с). Поэтому время выдержки киловольтметров под напряжением и время до измерения напряжения с момента начала выдержки принимаются равными. Описание работы управляющей ПК программы приведено в статье «Алгоритм работы установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ». Программа позволяет устанавливать различные соотношения между временами $T_{\text{вр}}$, T , t_1 , t_2 и задавать значения амплитуд напряжений. Результаты работы программы для $T_{\text{вр}} = 8 \text{ ч} = 480 \text{ мин}$, $T = 10 \text{ мин}$, $t_1 = 1 \text{ мин}$, $t_2 = 1 \text{ мин}$ и $U1 = 30 \text{ кВ}$ представлены на рис. 3.

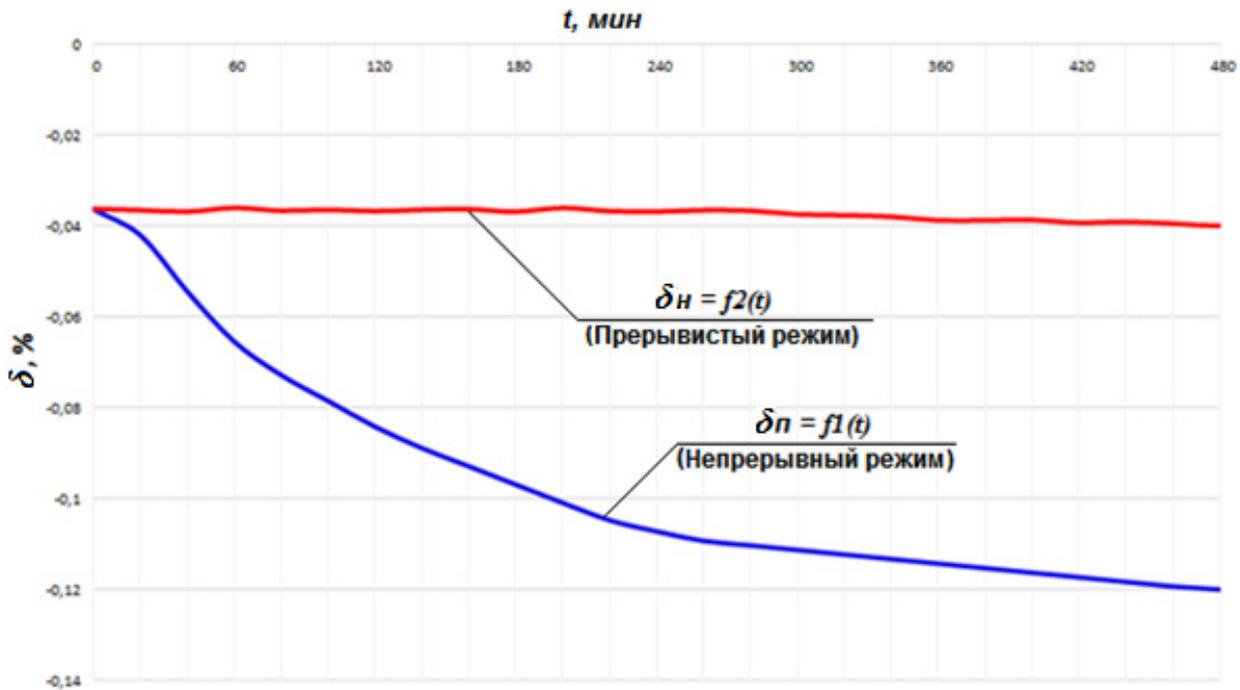


Рис. 3. Относительная погрешность измерения системы при различных режимах работы

На рис. 3 изображены зависимости относительных погрешностей измерения напряжения постоянного тока δ от времени проведения измерений t . Анализ функций $\delta = f(t)$ показывает, что при работе системы в непрерывном режиме (график функции $\delta_n = f_1(t)$) по истечению 8 ч изменение δ_n относительно первоначального значения составляет 0,1 %, а при работе в прерывистом режиме (график функции $\delta_n = f_2(t)$) изменение δ_n не превышает 0,01 %. Отличие форм графиков вызвано зависимостью компонентов установки от амплитуды и длительности прикладываемого к ним напряжения. Поэтому достижение высокой точности измерений при использовании непрерывного режима достигается повышением стабильности компонентов установки, что приводит к повышению стоимости установки [6, 7].

Использование прерывистого режима позволяет повысить точность измерения с помощью управляющей программы ПК путем сокращения временных интервалов в процессе измерений и автоматизировать процесс поверки, а также устанавливать соотношения интервалов времени t_1 и t_2 , в которых значение δ_n не превышает заданного на установку значения.

Используя в качестве объекта контроля вольтметр В7-40 совместно с входящим в комплектацию делителем, определим область значений временных интервалов для относительной погрешно-

сти измерения напряжений постоянного тока системы $\delta < 0,1 \%$. Исходными данными для оценки границ области выбраны временные интервалы $t_1 = 1$ мин, $t_2 = 1/12; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5$ мин.

Согласно методике поверки для вольтметра В7-40 установлено: время до подачи напряжения $t_1 - 1$ мин; время до измерения $t_2 - 2$ мин.

Длительность временного интервала до подачи напряжения более 1 мин незначительно влияет на относительную погрешность. Данная пауза между воздействиями напряжения позволяет привести в исходное состояние компоненты измерительной системы.

На рис. 4 представлена погрешность системы в виде трехмерного графика погрешности от приложенного напряжения в зависимости от выбранного временного интервала работы $\delta = f(U, t_1, t_2)$.

Анализ графика позволяет установить, что погрешность не превышает допустимое значение $0,1 \%$ в диапазоне (1/12 мин – 5 мин) воздействия высокого напряжения. Минимальная погрешность системы наблюдается при времени воздействия напряжения – 1 мин.

Скачок погрешности измерения в точке значения напряжения 10 кВ обусловлен переключением диапазона измерения блока измерительного СКВ-30ПТ. Однако данный фактор не влияет на превышение погрешности относительно допустимого значения.

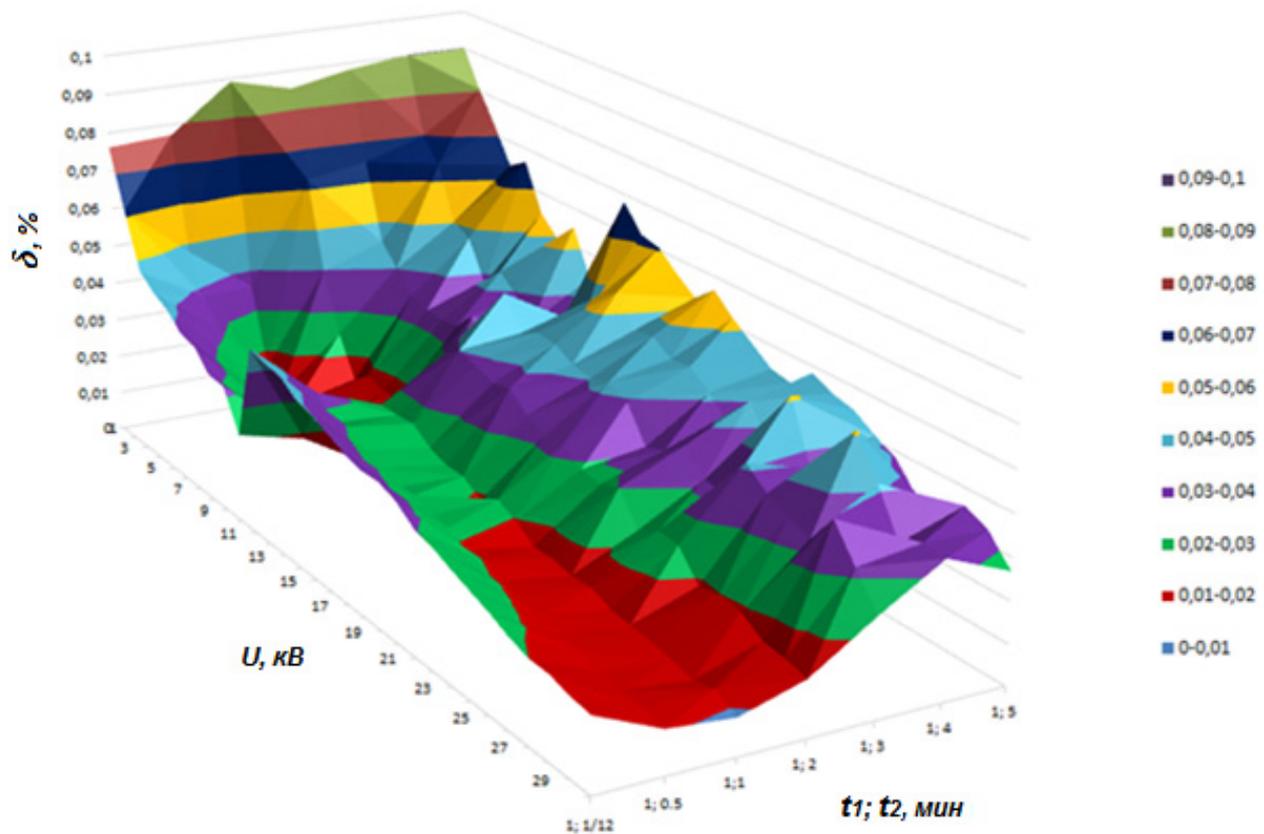


Рис. 4. Распределение относительной погрешности измерения в диапазоне временных интервалов работы системы от воздействия напряжения

Результаты выполненных исследований показывают, что:

- на имеющейся компонентной и аппаратной базе прерывистый режим позволяет обеспечить большую точность измерения, чем непрерывный;
- наличие в управляющей программе параметров, устанавливаемых оператором во время поверки вручную, позволяет автоматизировать процесс поверки;
- по заданной погрешности δ устанавливается диапазон временных интервалов, в котором должно работать устройство. Например, для вольтметра В7-40 имеет время до подачи напряжения $t_1 - 1$ мин и время до измерения $t_2 - 2$ мин, $\delta < 0,02 \%$.

Библиографический список

1. *Чеймберс, Д.* Выбор высоковольтного источника питания. Основные технические характеристики / Д. Чеймберс, К. Скапеллати // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – С. 148–151.
2. *Орнатский, П. П.* Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища школа, 1983.
3. *Раннев, Г. Г.* Измерительные информационные системы / Г. Г. Раннев. – Москва : Академия, 2010.
4. Алгоритм работы установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ / А. С. Ильин, Н. К. Юрков, В. Я. Баннов, Р. Ф. Плаксунов, А. П. Воронов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2020. – Т. 2. – С. 303–305.
5. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ. Описание типа СИ. Номер в ГРСИ РФ: 77593-20. – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1140753>
6. Вольтметр универсальный цифровой В7-40. Методика поверки. Часть 2 Тг 2.710.016 ТО.
7. Instruction manual. SPELLMAN EPM/SMS SERIES. High Voltage Power Supply. – URL: <https://www.spellmanhv.com>

References

1. Cheymbers D., Skapellati K. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies]. 2005, no. 6, pp. 148–151. [In Russian]
2. Ornatskiy P. P. *Teoreticheskie osnovy informatsionno-izmeritel'noy tekhniki* [Theoretical foundations of information and measurement technology]. 2nd ed., rev. and suppl. Kiev: Vishcha shkola, 1983. [In Russian]
3. Rannev G. G. *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy* [Measurement information systems]. Moscow: Akademiya, 2010. [In Russian]
4. Il'in A. S., Yurkov N. K., Bannov V. Ya., Plaksunov R. F., Voronov A. P. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2020, vol. 2, pp. 303–305. [In Russian]
5. *Ustanovka dlya poverki kilovol'tmetrov UPK-30PT. Opisanie tipa SI. Nomer v GRSI RF: 77593-20* [Installation for checking kilovoltmeters UPK-30 PT. Description of the SI type. Number in the GRSI of the Russian Federation: 77593-20]. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1140753> [In Russian]
6. *Vol'tmetr universal'nyy tsifrovoy V7-40. Metodika poverki. Chast' 2 Tg 2.710.016 TO* [Universal digital voltmeter V7-40. The method of verification. Part 2 of Tg2. 710. 016 TO]. [In Russian]
7. *Instruction manual. SPELLMAN EPM/SMS SERIES. High Voltage Power Supply.* Available at: <https://www.spellmanhv.com>

Ильин Алексей Сергеевич

инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: aalexeiil@mail.ru

Плаксунов Ринат Фатихович

начальник НПК-4,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: NPK-4@niiemp.ru

Воронов Александр Павлович

ведущий инженер,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: swe.voron@yandex.ru

Ilin Alexey Sergeevich

electronics engineer,
Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Plaksunov Rinat Fatihovich

head of NPC-4,
Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Voronov Aleksandr Pavlovich

lead engineer,
Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Кострикина Инна Анатольевна

кандидат технических наук, главный метролог,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: Tbmс2@mail.ru

Kostrikina Inna Anatolyevna

candidate of technical sciences, chief metrologist,
Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Исследование влияния режимов работы на погрешность измерения установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ / А. С. Ильин, Р. Ф. Плаксунов, А. П. Воронов, И. А. Кострикина // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 109–114. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-12.

A. V. Masloboev

TOWARDS A THEORY OF REGIONAL CRITICAL INFRASTRUCTURE SECURITY AND RESILIENCE

А. В. Маслобоев

НАВСТРЕЧУ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ И ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР

Abstract. Background. The work is aimed at modern theory of complex system security development in the context of an integrated methodology design for critical infrastructure security and resilience (CISR) management and CISR research systematization of regional socio-economic systems. The urgency of the study is conditioned by rising requirements for control operators and means for the purpose of CISR support at the regional level and the need to improve the regional security management system engineered on the basis of situational center network. The objective of research is to develop the theoretical and organizational-technical foundations of CISR management of the region as well as to analyze foreign experience in this field. **Materials and methods.** The research is carried out by the example of critical infrastructures of the Murmansk region, which is a part of the Russian Arctic. Three key CISR domains (dimensions) of regional socio-economic systems are considered: technological, organizational and societal resilience. The methodological base of the study includes systems approach, conceptual modeling, and convergence of control theory, reliability theory, risk analysis, safety and stability theory methods. **Results and conclusions.** An overview of the state-of-the-art research in the field of CISR management and an analysis of the existing models and methods applicability to problem-solving in this dynamic object domain are carried out. The novel holistic methodology of CISR analysis and management support is proposed. A conceptual model of CISR control system and a technique for resilience assessment of the regional critical objects and infrastructures have been developed. The application of theoretical developments will in prospect enhance the features of methods and tools used in practice to regional security support within the situational centers of the region, and to specify the information structure and forms of resilience management of the socio-economic systems as well as methods of risk assessment and analysis of the security violation of regional critical infrastructures.

Аннотация. Актуальность и цели. Работа направлена на развитие современной теории безопасности сложных систем в контексте разработки комплексной методологии управления безопасностью и жизнеспособностью критических инфраструктур (БЖКИ) и систематизации исследований БЖКИ региональных социально-экономических систем. Актуальность работы обуславливается возрастающими требованиями к органам и средствам обеспечения БЖКИ на региональном уровне и необходимостью совершенствования системы управления региональной безопасностью, построенной на базе сети ситуационных центров. Целью исследований является разработка теоретических и организационно-технических основ управления БЖКИ региона, а также анализ зарубежного опыта в этой сфере. **Материалы и методы.** Исследования проводятся на примере критических инфраструктур Мурманской области, региона входящего в состав Арктической зоны России. Рассмотрены три ключевые области (измерения) БЖКИ региональных социально-экономических систем: технологическая, организационная и социетальная. Методологическая база исследования включает системный подход, концептуальное моделирование, конвергенцию методов теории управления, теории надежности, анализа риска, теории безопасности и устойчивости. **Результаты и выводы.** Проведены обзор современного состояния исследований в сфере управления БЖКИ и анализ применимости существующих моделей и методов для решения задач в этой динамичной проблемной области. Предложена методология управления БЖКИ. Разработаны концептуальная модель системы управления БЖКИ и методика оценки жизнеспособности критически важных объектов и инфраструктур региона. Применение теоретических разработок в перспективе позволит расширить возможности используемых на практике методов и средств обеспечения региональной безопасности в ситуационных центрах региона, конкретизировать информационную структуру и формы управления жизнеспособностью социально-экономических систем, а также способы оценки и анализа рисков нарушения безопасности региональных критических инфраструктур.

Keywords: resilience, security, risk, critical infrastructure, regional socio-economic system, management, modeling, methodology.

Ключевые слова: жизнеспособность, безопасность, риск, критическая инфраструктура, региональная социально-экономическая система, управление, моделирование, методология.

Introduction

At present, it is necessary to maintain and organize an effective information support of regional critical infrastructure security and resilience (CISR) management on the basis of threat and vulnerability sources outpacing monitoring and comprehensive analysis of the regional socio-economic systems to reduce different types of uncertainty under decision-making processes in the rapidly changing conditions. A lot of various emergency situations are arising dynamically in the regional critical infrastructures both predictable and unpredictable. This leads to increased requirements for modern security support systems and technologies aimed to improve effectiveness of safety and resilience control of critical objects in the socio-economic sphere. Therefore, methodology development of the regional CISR management is urgent and perspective field of research which is facing a whole range of problems caused by crisis situations in national and world economy, escalation of international relations, conflicts and instability in social and economic sectors, uncontrolled external threats in military and political areas, anthropogenic impacts on the environment and natural challenges, etc.

Efficiency enhancement of CISR management is one of the key directions and significant strategic goals of public policy both at regional and national level in concordance with National Security Strategy of Russian Federation [1]. To purposeful goal achievement and problem-solving a network of distributed situational centers [2] was created and expanded as a relevant tool for digital transformation of governmental management in security and defense areas of socio-economic development. Physically and conceptually this network is regarded as a backbone part of the regional CISR management system.

Decision support systems are the basis of the information environment of distributed situational centers for regional security management. The central problem for this class of systems in the field of regional security and critical infrastructure resilience management is coordination of the control actions preparation and implementation at different decision-making levels in conditions of decentralized control and external environment high dynamics as well as taking into account the influence of human factor.

Effectiveness of the regional critical infrastructure resilience management processes is based on the decision-making information support quality and the results of monitoring, evaluation and comprehensive analysis of a wide range of heterogeneous security indicators that allow assessing current status of critical objects and situation in the region, as well as risks of its sustainable development destabilization. In the context of digital economy it becomes more obvious that these integral indicators used in the decision-making procedures and management information systems provide possibilities to critical infrastructure resilience level measurement and assessment, prediction and implementation of the adequate crisis-proof measures directed to various negative consequences prevention on the basis of modern information technologies and computer modeling.

The most acute CISR problems are revealed at the regional level that leads to higher-level socio-economic system destabilization (national, global, etc.). Therefore, an improvement of the existing organizational management system of regional CISR is considered as a significant and urgent problem having a strategic importance for state policy of each region and country in general. However, it is up-to-date still far from being effectively addressed. At present, this problem is especially relevant for the Arctic regions of Russia.

In our study we go towards the theory of CISR and give an overview of its state-of-the-art background and foundations. Moreover, we discuss conception of critical infrastructure resilience from the position of system approach based on security foundations analysis and propose a complex methodology to regional security and critical infrastructure resilience management and information support. Particularly, our research is carried out by the example of critical infrastructure resilience of the Arctic region, which is influenced by a multitude of heterogeneous internal and external threats and hazards.

Research motivation and Problem statement

The specificity of regional CISR, as a subject of inquiry, is determined by the following features:

- the heterogeneity of emergency situations arising in various critical infrastructures of regional socio-economic system;

- the absence of information completeness characterizing the system (situation) status, its external environment and interaction at the target time;
- the impossibility of full taking into account all the factors (threats) and clearly defining an action plan for all probable scenarios of situation dynamically changes;
- the various nature, latent character, slow rising and delayed result adjournment of the threat and danger impact on system functioning that provides a slack for operational and strategic managerial decision-making, in contrast to the safety management of critical objects under extreme emergency cases;
- the existence of poorly formalized and difficult-to-automate initial stages of the crisis situation evolution life cycle in the critical infrastructures of regional socio-economic system associated with the emergence of potential threats and hazards;
- the presence of variety aspects influencing on managerial decision-making in the field of critical infrastructure resilience control and regional security support (political, economic, social, organizational, technical, regulatory and legal, etc.);
- the multi-aspectivity, interconnectivity and high uncertainty of processes taking place in the critical infrastructures of regional socio-economic system.

Low efficiency reasons of the regional CISR management in the Arctic region of Russia basically are:

- the absence of unified organizational management system of critical infrastructure resilience in the region, including information infrastructure of regional security control;
- the interaction coordination complexity and, in some cases, impossibility of the organizationally heterogeneous and geographically distributed security control actors at different decision-making levels;
- the decentralized nature of regional socio-economic system security management and critical infrastructure resilience control in the region;
- the diversity and isolated application of methods and tools for automation of regional security and resilience support processes at various management levels;
- the fragmentary nature of interdepartmental information interaction organizational and technical regulations under emergency situations and the absence of a unified regional security passport and critical infrastructure resilience legal standards.

The main key disadvantages of the regional CISR management system in the Arctic region are, firstly, the lack of an integrated information infrastructure for regional security control. Secondly, the non-coordination of decentralized decision-making at different security management levels. And, thirdly, the rigid centralized security and resilience management scheme implementation in the regional critical infrastructures under conditions of distribution and organizational heterogeneity of the control actors participating in the regional security support processes. Centralized security control is ineffective in real conditions and does not provide the desired effects.

Regional specificities that are individual for each region add to the issues. Such specific features of the Arctic region requiring regional security and critical infrastructure resilience management system enhancement and development are geographical location, relatively sparse population, low stability of ecological system due to enhanced climate change effects and slower natural renewal processes, underdevelopment of infrastructure, relative remoteness and distances federal and population centers, skilled personnel shortage, demographic problems, specificity of economic development and territory exploration, multiple objects redundancy of military-industrial complex. The great mixture of all these factors determines the regional critical infrastructure vulnerability in terms of emergence of the various types of natural, anthropogenic and socio-economic crisis situations. The consequences neutralization of such type of situations requires operational and effective managerial decision-making in exceedingly limited time. This necessitates a shift to the network-centric control model [3] of regional CISR management.

The solution of this problem is for the most part hampered by the needs of large volumes of semantically and organizationally heterogeneous information integration, processing and analysis for activities information support of critical infrastructure resilience management entities, as well as interaction coordination between them at all regional security control levels. Therefore, a development of the comprehensive methodology for critical infrastructure resilience management information support as well as an adaptation of the state-of-the-art security theory foundations and risk-analysis models are needed to efficient problem-solving specified above.

Background and Related work

Any society is highly reliant on interconnected infrastructures providing essential services, so-called vital societal functions [4]. The Arctic region environment with its remoteness and climate conditions illustrates the importance of building capacities and capabilities, across several elements, dimensions and domains, to withstand and rapidly recovery from human-induced, technological and natural disasters, or their combinations. That means that critical infrastructure that support vital societal functions in such environment need to be particularly resilient and secured.

The rapidly change in world policy and military situation, national economy and climate conditions introduces new threats and vulnerabilities in regional socio-economic systems, power systems, transportation systems, communication systems, and other infrastructures. Local, regional and national communities and authorities, and most notably infrastructure operators, require a realistic estimate of the security and resilience level of the available infrastructures, which should meet the expectation, needs and tolerances of the end-user, being the society.

Hence, in order to assess CISR in the Arctic region, it is not appropriate to only account for the physical-cyber infrastructure itself. Information and data from several resilience domains need to be merged and integrated, processed and analyzed, and there is a need to develop suitable models and methods for regional CISR management and assessment.

According to the European Council Directive a critical infrastructure can be defined as [5]: "an asset, system or part thereof Member State which is essential for the maintenance of vital societal functions, health, safety, security, economic or social well-being of people, and the disruption or destruction of which would have a significant impact in a Member State as a result of the failure to maintain those functions". Several non-EU countries have adopted similar definitions with some variations [6], so this is the definition used in the current study.

While there thus is some shared understanding what a critical infrastructure is, the definition of resilience is a more contested one. Nevertheless, the United Nations provides a generic definition that is suitable for our purpose, defining resilience as [7]: "The ability of a system, community or society exposed to hazards to resist, absorb, accommodate, adapt to, transform and recover from the effects of a hazard in a timely and efficient manner, including through the preservation and restoration of its essential basic structures and functions through risk management". In [8] we have developed formalized multiple-theoretical models of basic concepts: system resilience, critical infrastructure and resilience control system using conceptual modeling methodology. The proposed inside [8] conceptual model of regional critical infrastructure functioning takes into account threat dynamics and provides its modeling, despite the fact that almost possible threats are assigned in advance. For each type of threat a complex of protective measures is offered.

With the above definitions in mind, and considering the available data in the Arctic region of Russia, the objective of our research is to further develop and tailor existing methods and information technologies to analysis, evaluate and improve regional CISR in Russian Arctic by the example of Murmansk region. Beside the growing scientific literature on CISR, to our knowledge there exists no serious and holistic analysis of the subject and related challenges applied to the Arctic regional context. Our study will fill in that research and practical knowledge gap. Regional CISR management guidelines, based on interdisciplinary approach and state-of-the-art research, are needed to maintain risk-sustainable development of the Arctic region.

In order to do that and to narrow the scope to realistic dimensions, there has to be a clear idea on which domains of security and resilience need to be included in closer scrutiny. In the Arctic regional CISR context, we believe that three domains are especially important: technological resilience, organizational resilience and societal resilience.

The Arctic region is one of its type in the Russia, due to many of its specific characteristics compared to other regions and northern territories. Yet, in terms of science and societies at large, it is not sui generis from the point of view of social, natural, engineering or computer sciences, et. al., as is no other region. In terms of how to manage regional CISR, the best way to approach the Arctic region challenges is to look at the more generic scientific context and available knowledge first, then apply that knowledge to the Arctic region. In so doing, we may find some clues and perhaps even solutions that have already been tested elsewhere. Yet, while data acquisition and analysis on generic phenomena relating it to the area-related idiosyncrasies from the Arctic region at the same time, one can contribute to the more generic picture of the state-of-the-art with some new insights.

In our case, it is the question about the strive towards a safe and resilient, i.e. risk-sustainable, socio-economic development of the region through enhancing its CISR. The concept of resilience emerged into the scientific literature within the ecosystem theory in the 1970s [9-10]. It received a minor attention during the subsequent two or three decades. From early 2000s onwards, however, the concept was popularized in many other fields, not least in disaster management and other fields related to safety and security. A socio-economic system risk-sustainability (“resilient society”) became the new catchword, an umbrella concept indeed, comparable to, and partially overlapping with, the earlier emphasis on sustainable development for a comprehensive review of security and resilience literature [11].

While the above-mentioned UNDRR definition of resilience works rather well as a baseline, the concept is much more multi-faceted, competed and in many ways rather vague. Indeed, we could call it as resilience discourse, the exact boundaries of this discourse still being rather obscure and including several sub-discourses and application areas. In scientific literature, e.g. [12], we may differentiate between several dimensions, so-called domains of resilience: community, social, societal, ecological, environmental, economic, functional, organisational, personal, psychological, cyber-physical, technological, etc. As known, various attempts were made to manage regional CISR centrally, but this did not provide the desired effect, since there are many diverse resilience domains listed above. All of these key dimensions had to be tied together. In our opinion, an application of network-centric control approach is a convenient way to address this complex problem, because it most adequately reflects to real nature of the socio-economic system resilience management and takes into account the decentralized character of regional security support processes, both in terms of functional structure and control actor composition.

Due to the penetration of the resilience concept into multiple disciplines, its theoretical basis remains rather versatile, and even contradictory. For social scientists, it is mostly about adapting to the changes in the society. This debate is characterized by those who, on the one hand, see the resilience discourse as part of a neoliberal tendency, as transferring responsibilities of the public authorities to the civil society and citizens, in the context of further privatization of welfare and other services. On the other hand, those who see this development by contrary as emancipation of the citizen, adding to their self-adaptive capacities and survival strategies. For spatial and urban planners [13], resilience is usually about “resilient design”, focusing on preventive planning against disaster consequences, as well as community ownership and empowerment issues for the same goal. In the field of engineering, over the last 10–15 years, “resilience engineering” has been proposed to deal with safety and security in socio-technical systems. The intention, as stated in [14], is to “enable systems and organisation’s to continue to operate in the face of unforeseen large scale demands, as well as to improve their everyday functioning”. In practice, this means to find ways to measure the protective, adaptive and restoring capacities of systems, in order to enhance them [15, 16]. The main problem is how to put these different theoretical and methodological subjects and concepts together. This problem-solving consists in the framework of resilience dimensions (security domains) integration that is helpful in the way of focusing on different but related actors, such as public authorities, civil society, infrastructure owners and operators for the efficient network-centric management of regional security and resilience.

Our analytical survey of the domestic scientific literature and experience showed that systemic basic research on the regional CISR problems in Russia have not been previously carried out. This also applies to the Arctic region and socio-economic and environmental safety management of its critical objects. Domestic publications for the most part touch upon the issue of individual dimensions of the critical infrastructure security and socio-economic system resilience with varying level of problem domain detailing based on system approach principles, control theory, reliability theory, risk analysis and safety methodologies. Thus, [17–19] analyze and discuss a wide range of problems and issues of the theory and practice of critical infrastructure security violation risk management as well as certain resilience aspects of socio-economic system critical objects in conditions of the uncertainty and incompleteness of source information for decision-making. Appropriate models and methods are proposed for various relevant applications in the field of comprehensive security of critical infrastructures. The recommendations for safeguarding of the critical infrastructure objects from the natural and anthropogenic emergency situations, as well as for taking into account the impact of human factor within the risk assessment and analysis of critical infrastructure functioning by the example of system research and development of the regional security and social resilience management support, are given. The distinctive feature of domestic studies as compared with foreign research is the point of view on resilience and security of the socio-economic systems and processes studied.

Thus, foreign researchers are focused on the personal and civil society point of view in analysis of the critical infrastructure security problems, while Russian scientists often abide by state and national interests in these issues.

A wide variety of methods is observed in the theoretical base of basic research on the CISR control problems. Generally, the methodology for CISR research and analysis has overlaps in methods used within the other scientific disciplines: reliability theory, risk management, security control, sustainable development, crisis management, viability theory, stability theory, system safety, acceptable risk conception, etc. These fields of research have made an essential effect on the fundamental formation and development of the theory of critical infrastructure resilience. Thus, the position of critical infrastructure resilience theory among the specified scientific concepts can be represented as a symbiosis result of the corresponding field of knowledge. On the basis of mentioned scientific paradigms and control theory foundations we have designed a generic conceptual model of the regional CISR management system, including control object, regulator, external environment, input and output resources, data flows, system state evaluator, etc. This conceptual model is schematically shown on Figure 1. Figure 1 also illustrates the main steps of security and resilience control algorithm and accounting of various factor impacts occurred in management process.

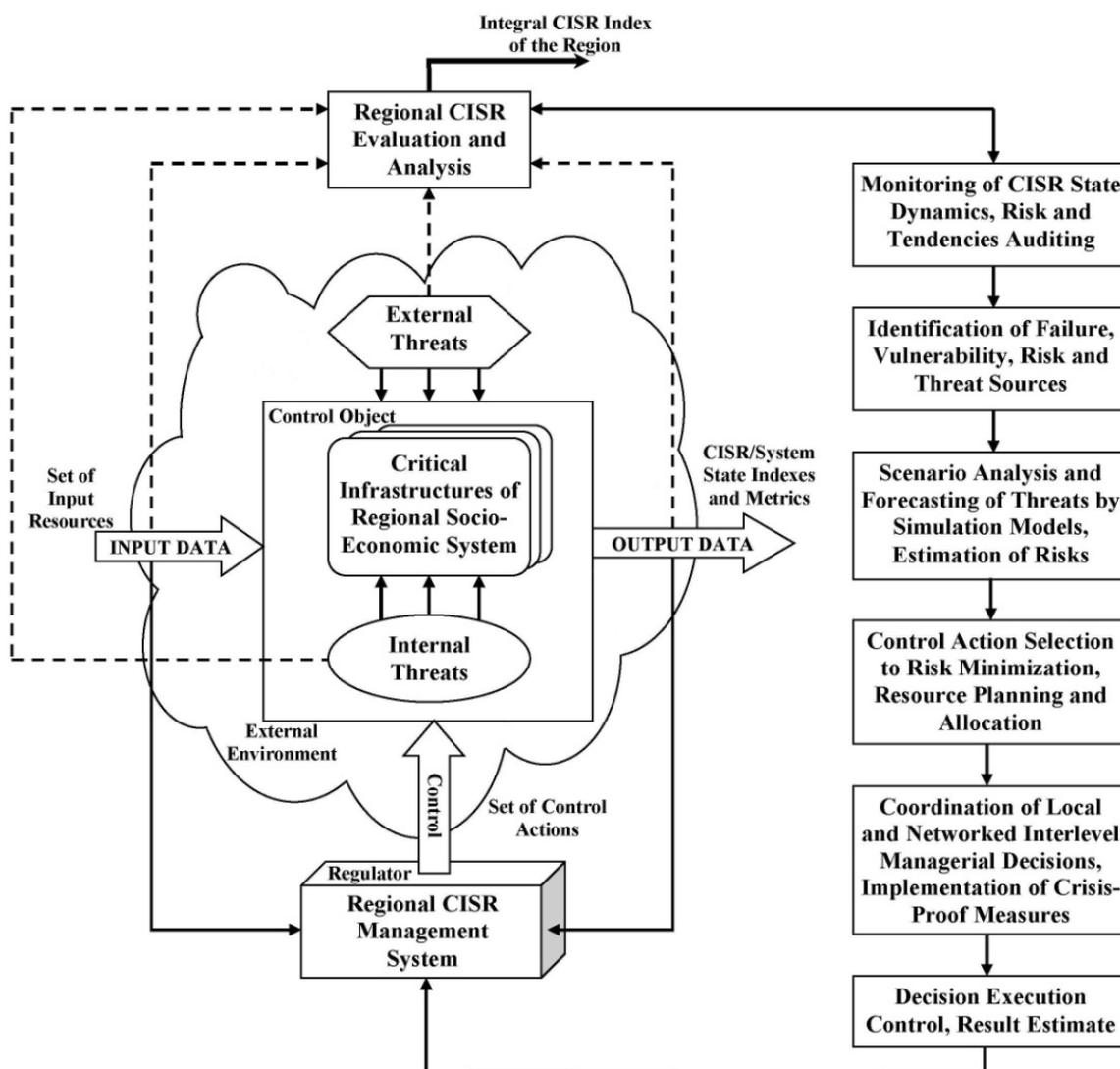


Fig. 1. Conceptual model of regional CISR control system

In the general case, a choice of particular method for critical infrastructure resilience and security analysis and control depends on the measuring of system resilience domain on which the each individual researcher focuses his or her attention (e.g. community resilience, societal resilience, human resilience, economic resilience, environmental resilience, technological resilience, organizational resilience, cyber re-

silience, etc.). Within the bounds of the given measurements of critical infrastructure resilience separate systems, processes and phenomena are studied that are most significant for specific problem-solving under research. At the same time, in most cases coherence and associations of the studied type of system resilience with other components of critical infrastructures are omitted from the consideration and analysis.

CISR conceptual domains

While the definitions differ and overlap, technological, organizational and societal domains are most notably connected to our research subject and objectives. To keep these domains analytically separate is justifiable as they are crucial in defining which actor is responsible for a certain type of resilience action. Technological and organizational resilience domains are the most important ones from the perspective of regional critical infrastructure operators. The societal domain cannot however be ignored as critical infrastructure operators are obliged by government regulation, and in the event of a major disturbance, they are in direct relation with emergency services and the clients. Finally, the critical infrastructure is supposed to secure vital societal functions, first and foremost, to the regional socio-economic risk-sustainable development and society at large. Therefore, technological, organizational and societal resilience domains are tightly interconnected and provide joint risks and challenges for critical infrastructures of regional socio-economic system declared above and taking into consideration under our discourse.

Let us take a closer look at these three interrelated resilience domains that cover most of the issues related to CISR of the Arctic region, as well as their overlapping area of risks and challenges.

Societal resilience refers not only to public policy and services related to infrastructure or related vital societal functions, but also to the ability of social groups and the society at large to cope with external stresses and disturbances as a result of contingencies. It is thus related to the needs and tolerances of the community, which is dependent on the service provided by critical infrastructure. Having this information the regional critical infrastructure operators could set their minimum required service levels required from them. Closing the gap between public expectations and the actual service level provided, can be solved through effective communication, illustrating the bi-directional link between a resilience assessment in technological and organizational domains, on the one hand, and societal resilience, on the other hand.

There exist many efforts to define societal resilience (or social, sometimes community, although defined in a various ways), and there can be found a lot of good practices of resilient communities. In any case, the focus in societal resilience is on the problems of local communities when it faces crises, emergencies or disasters, where critical infrastructure, or its service disruption, may or may not play a crucial role. Yet, even if the source of a disaster is the disruption of critical infrastructure service, the question is not usually on absorptive but adaptive capacities toward these critical infrastructure disturbances. Often societal resilience research is connected to bio-socio-economic issues and social capital.

There is no one, agreed-upon metrics to evaluate societal security and resilience. Moreover, many of the societal resilience approaches are very generic ones, and thus difficult to handle. While quite a few efforts to develop societal resilience indicators and indices exist e.g. [20], they often only list socio-economic or institutional-political indicators at a very general level. They typically present a set of indicators for measuring baseline levels of community resilience. These can include a number of elements of society that are supposed to measure security and resilience, such as: educational equity, age structure, transportation access, communication capacity, language competency, special needs, health coverage, place attachment, political engagement, social capital in terms of religion, social capital in terms of civic involvement and advocacy, innovation, cohesiveness and trust, societal relationships, contentment with life, conflicts, communication between stakeholder groups, power and political structures, engagement of young people, responses to and opportunities for influencing change, learning and knowledge, knowledge utility and transfer (learning from experience), participation in decision-making, engagement of community resources, stakeholder agency, etc.

At best, in terms of concreteness, the scientific literature on societal security and resilience suggests indicators that reflect the emergency management and self-assistance capacities of the community. Occasionally, one can find efforts to consider the linkage between infrastructures and social systems [21], arguing that there is a need to link physical systems and human communities in order to measure and enhance societal security and resilience. From the perspective of regional CISR and related disturbances, it has how-

ever been emphasized at least three essential criteria or guidelines that should be taken into account: know the public stakeholders and their expectations; meet expectations; share disaster-related information [22].

Organizational resilience refers to the sectors, organizations and institutions that manage the regional critical infrastructures, including processes of organizational capacity and capability, planning, training, leadership, communication, etc. Organizational analysis is most often done qualitatively, but can in some cases be transformed to quantitative or semi-quantitative scales.

In the field of organizational resilience, there is a growing body of scientific literature that literally aims at developing indicators to measure an organizations resilience, e.g. [23], as well as a number of national and international standards ISO 28002:2011, ISO 28004:2014, etc. In fact, the first resilience standards are related to organizational resilience. Thus, the ISO 28002 standard for resilience in the supply chain was approved in 2011, based on the U.S. ANSI/ASIS.SPC.1:2009 organizational resilience standard.

The focus of this literature is primarily on organizations that own and manage regional critical infrastructure facilities. The purpose is to measure the ability of an organization to withstand disturbance of regional critical infrastructure facilities and maintain or quickly regain function. In practice, this takes place mostly in self-auditing manner, motivated by self-interested profit-seeking in terms of business continuity, although also public good considerations might be taken into account, at least for the sake of possible reputation costs.

To be safe and resilient, organizations must take into account such factors as strong and flexible leadership, an awareness and understanding of their operating environment, their ability to adapt in response to rapid change, etc. Yet, while at the first sight, this is a rather straightforward process, and as such suitable for standardization, it becomes more complicated due to the fact that social and cultural differences must be considered. Also such indices as innovativeness, creativity and improvisation skills of the organization leadership are often put forward, which however are rather difficult to measure, except post factum.

Technological resilience (sometimes technical or engineering) refers mainly to the physical properties of the regional critical infrastructures, focusing on their ability to resist damage and their loss of function during an over-stress situation. Technological security and resilience looks the issue at stake from an engineering point of view. While technological resilience includes elements of organizational resilience, and these two domains in a way require each other in many cases, the main difference is that resilience is achieved by technological rather than organizational solutions.

The main actors in the context of this domain of regional security and resilience are critical infrastructure operators, that is, those very facilities that produce the critical services. The role of authorities might be to regulate or control that the technical standards are followed. Furthermore, in most cases, the in-house technological or engineering capacities and capabilities of a service producer are not enough, but one has to rely on manufacturers or vendors for resilience-related technological solutions.

There is no officially approved definition of technological resilience in the context of regional critical infrastructure security in terms of international standard. However, a certain level of consensus has been emerging in the related scientific literature. From the standard definition of security, including resilience, one can already derive the main elements of technological resilience. If a resilient infrastructure is a component, system or facility that is able to withstand damage or disruption, but if affected, can be readily and cost-effectively restored, then there are three key technological concepts in resilience that should be demanded from a resilient critical infrastructure: resistance, absorption-adaptation (minimizing the consequences of disruption) and restoration capacity. Resistance could also be described with the term robustness [24], which is the ability of a system to resist or withstand an extreme event of a given level and still maintain some degree of system function.

Every engineering solution is naturally one of its own kinds. Yet, already this rather minimalist definition provides us a rather straightforward understanding about what are the general attributes or elements could be measured in respect to resilient infrastructure – especially from a technological perspective.

In modern literature on technological security and resilience, one can find more or less detailed typologies and indicators [25–27]. In fact, [28] provided already early on a typology of the resilience aspects of an earthquake that could be applied to critical resilience as well. This typology included four levels: robustness, redundancy, resourcefulness and rapidity of recovery. This typology, in turn, has been repeated with some variations in most definitions of resilience. For instance, the politically influential definition [29]

includes four factors: robustness, which is the ability to keep a critical infrastructure operating or stay standing in the face of disaster; resourcefulness, which means a skilful management of a disaster once it unfolds; rapid recovery, which refers to the capacity to get things back to normal as quickly as possible after a disaster; and, finally, learning, that is, the ability to absorb new lessons that can be drawn from a catastrophe [26].

Often when one approaches technological resilience it is illustrated by the so-called resilience triangle [30], which expresses performance loss in function to time of recovery. Increased resilience means that the triangle space will be reduced, and, hopefully moved to the right to enhance time for preparedness measures. By definition, this triangle presupposes the phase before any disruption, that of a downward curve and the upward curve, and last, post-disruption phase when the service level has been restored. In some fields, such as urban planning, the idea of "rebuild it better" is applied, thus the starting performance level becoming higher as it was before the incident. Thus, local communities may use a disaster as an opportunity to regenerate an area. In pure technological fashion, which however captures the essence of security and resilience in many ways, Figure 2 illustrates this "resilience triangle" function as reproduced in [31].

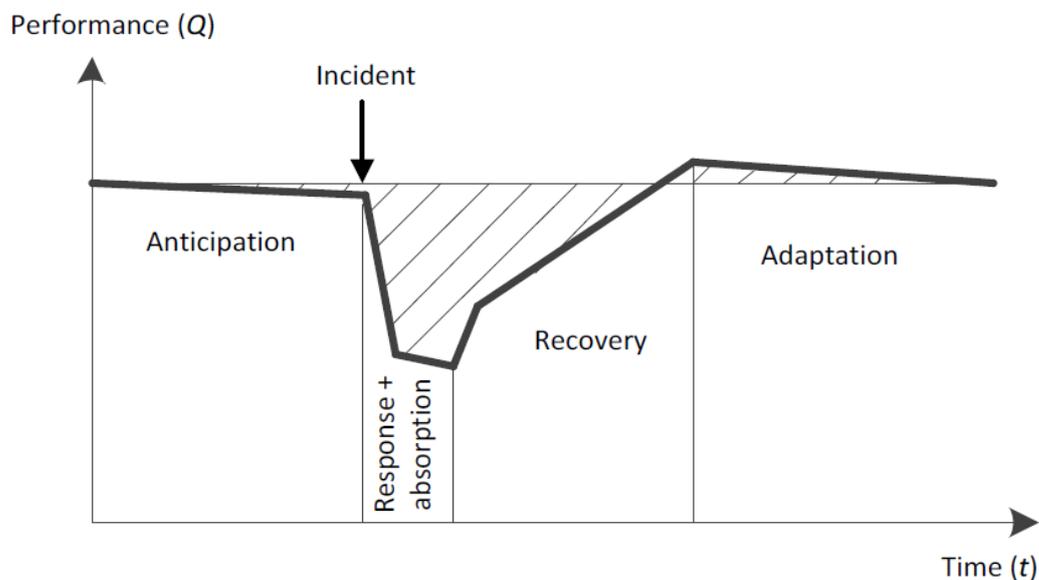


Fig. 2. Resilience triangle function: performance loss and recovery [31]

Regional CISR management technique

The question arises how we can evaluate regional CISR, and through that, enhance it. How to make the Arctic region more secured and resilient, especially those elements that are related to vital societal functions and socio-economic sphere of development, in order to "meet the basic needs of the population and society" and those "services and supplies" that have to be maintained in order to meet needs [4].

To address this problem a systematization and development of the CISR network-centric management system in the Arctic region is basically needed by preparing and implementing fundamental and practical guidelines (namely, holistic methodology), which, on the one hand, draw on the generic CISR foundations but, on the other hand, are tailorable to the specific regional conditions, taking into account the emergence of dynamic changes and challenges that Arctic specificity and external environment are bringing.

To assess and improve regional CISR, a step-by-step guidelines, inspired by ISO 31000 risk management standard (ISO 31000:2018, ISO 31000:2009) and applied to CISR in more generic contexts according to IEC/FDIS 31010:2019 standard, can be used and adopted to the Arctic regional environment. By mapping CISR against the widely approved and applied risk management standard, and using the same terminology and structure, has its advantage in that many organizations and institutions already are familiar with it. The approach thus enhances the current risk management, prevention and preparedness practices by adding the CISR component to it, and in so doing, enhances and systematizes especially the during-and-after contingency management and overall resilience of the community, its vital functions, and societal and infrastructure elements that these functions are dependent on. The main phases and elements of this kind of approach are illustrated in Figure. 3.

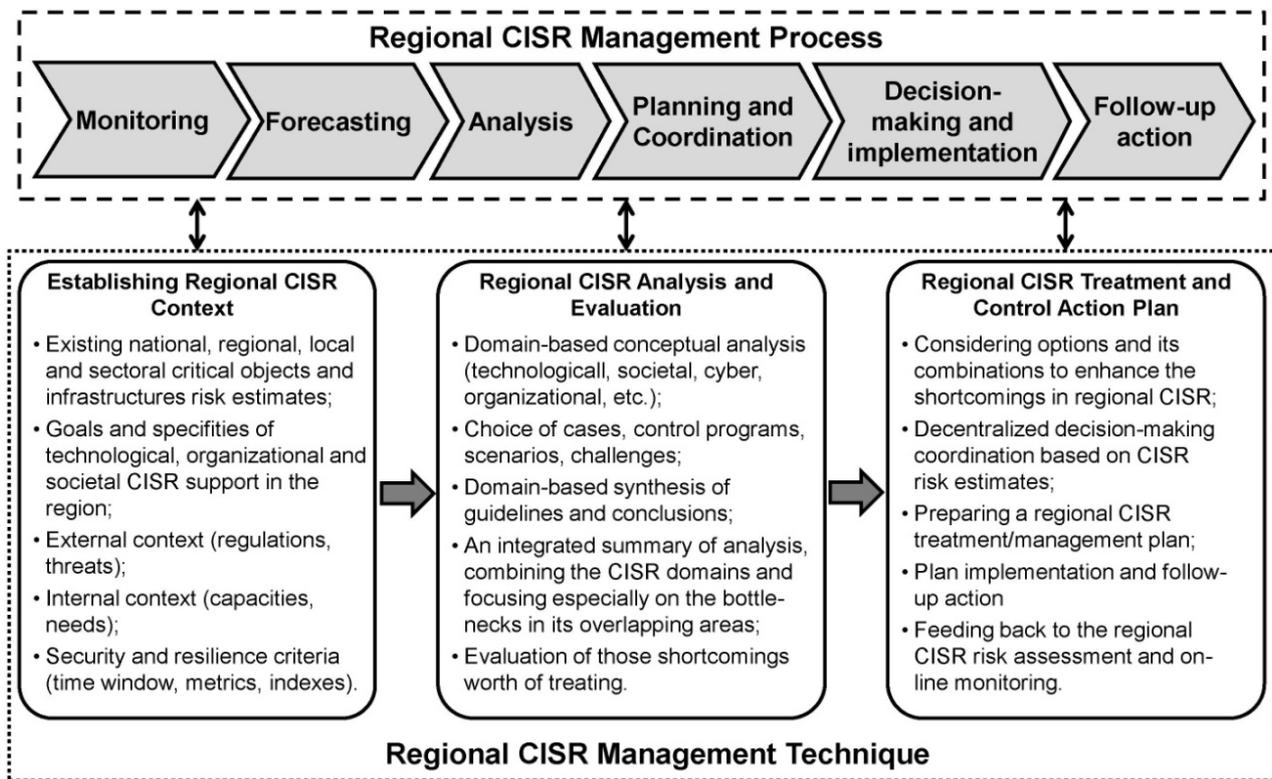


Fig. 3. Steps and components of regional CISR management technique

In the above illustration of the regional CISR management and assessment process, the following definitions are used:

- regional CISR management is the name of all of the coordinated activities to defined the below processes;
- regional CISR context refers to establishing the basic parameters for CISR assessment, taking into account the regional specificity and especially creating a shared understanding about the risks that might play out at the all levels of management;
- regional CISR analysis is the process to comprehend and to determine the level of regional security and resilience;
- regional CISR evaluation is the process of comparing the results of the regional security analysis with criteria or objectives to determine whether the level or resilience is acceptable and to identify areas for improvement;
- regional CISR treatment is the process of developing plans for enhancing regional security and resilience, focusing on the absorptive, adaptive or restorative capacity of socio-economic systems.

Novel holistic methodology of CISR management support

Regional CISR management is multifunctional in its structure and generally includes such control functions as targeting, strategic planning, operational management as well as control, accounting, monitoring and coordination functions. Therefore, information and analytical support of CISR management is a complex and multidimensional problem.

To address this issue we propose a methodology and model suite that provide workflow automation and interaction consistency of the critical infrastructure resilience management actors and entities at all decision-making levels (strategic, operational and tactical) at the expense of appropriate information support and coordination of the regional security network-centric control based on application of autonomous software agents and simulation tools. Our methodology is designed on the basis of methods integration for conceptual, system-dynamic and multi-agent modeling of multi-level distributed systems [32]. The methodology and its principal components are schematically represented in Figure 4.

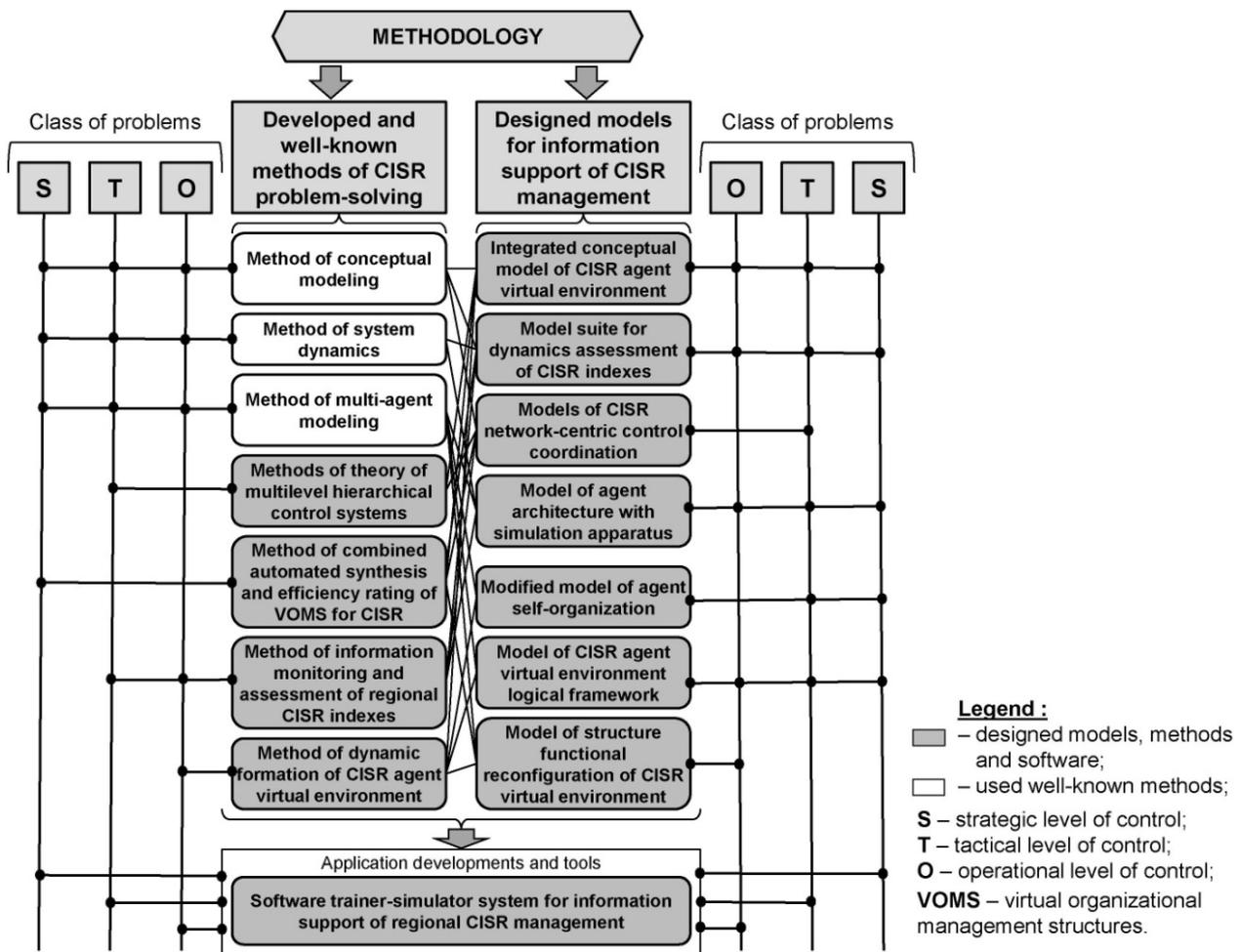


Fig. 4. Holistic methodology of CISR analysis and management support

The methodology tool framework includes following developed models and methods [32]:

1) Modeling tools:

- An integrated conceptual model of the multi-agent information environment for regional CISR which is a formal framework for automation and simulation of regional CISR management processes. Formalized models of the regional security problem domain and the executive environment for information and analytical support of critical infrastructure resilience control are combined within the model. For practical applications the model is implemented as an unified OWL-ontology used in decision support system of regional situational centers.

- An agent-based multi-level recurrent hierarchical model for risk-sustainable development management of regional socio-economic systems. The model is designed to network-centric control coordination of regional CISR. The model specificity consists in the use of functional-target technology and mathematical apparatus of hierarchical multi-level system theory for the purpose of coordination procedures implementation of local network-centric managerial decisions. The model combines coordination techniques by unleashing interactions and agent coalition formation at various control levels.

- A set of simulation models for risk and failure prediction of the regional CISR based on the original metrics derived by a number of groups convolution of the generally accepted reliability indices. The model suite provides both derivation of the integral estimate of regional CISR, and assessment of its individual components.

- A functional organization model of the intelligent agents having hybrid architecture with built-in simulation apparatus. The simulation apparatus corresponds to a complete or simplified model of the agent functioning environment recurrently evoked during the modeling process and provides a local forecast of results of the agent potential activity. System-dynamic models are used as a framework of agent simulation apparatus engineering and implementation.

2) Methodical tools:

– A method for automated synthesis of the multi-agent model specifications of organizational structures for regional CISR management under emergency situations of various types. The method is based on a joint analysis of the semantic description of solving control problems, information resources and agent services. The method provides dynamic formation of agent coalitions and associated virtual resources that are appropriate to the security management problems being solved.

– A method for a comprehensive assessment of the integral security and resilience indices of regional socio-economic system critical infrastructures based on matrix formation and analysis of the CISR metrics (indices) and providing an indicated assessment of regional security and critical infrastructure resilience under various regional development scenarios on the basis of expert-simulation modeling.

– A method and tools for multi-agent virtualization of regional CISR management process providing purposeful behavior adaptive modeling of each security control actor as an autonomous pro-active agent with its own interests and goals at all decision-making levels. The method is based on multi-agent and ontological modeling toolkit enhancement by means of implementation the agent simulation apparatus and semantic-driven integration of heterogeneous information resources and services.

– An agent-based technology for information monitoring of regional CISR threats and failures using autonomous software agents and special sensors for data acquisition and processing.

– A multi-agent technology for dynamic synthesis and configuration of the virtual environment of regional CISR based on the agent self-organization models and algorithms.

3) Software Tools:

– A peer-to-peer agent platform for distributed modeling of regional CISR management and software agent functioning support of the heterogeneous security control actors. The platform is designed on the basis of a service-oriented architecture.

– A software multi-agent system for information support of regional CISR management, which provides formation of virtual organizational structures for safety management in the region.

– A software trainer-simulator complex for modeling, forecasting and scenario analysis of the critical infrastructure functioning and development of regional socio-economic systems, which allows assessing and studying the dynamics of regional security and resilience indices.

– A multi-subject-domain web-oriented information system Ru-Arctic, which implements a unified access point to information environment (i.e. shared resources and services) of the regional CISR.

– Professional social network BarentsNet, which provides an automated search and selection of CISR control actors and their joint virtual cooperation within the distributed information environment of the region.

– A trainer-simulator tooling suite «Virtual Cognitive Center» intended for distributed expert-simulation modeling of emergency situations development in the regional critical infrastructures and network-centric control coordination of regional socio-economic system security and resilience. Technologically, this virtual management-simulator is implemented as a hybrid cloud service, e.g. SaaS (Software-as-a-Service) or IaaS (Infrastructure-as-a-Service).

The methodology provides wide and flexible possibilities to bundled software and modeling tools engineering for multi-agent network-centric information environment implementation of the regional CISR management. This software and model suite can be used to a range of practical control problem-solving in the field of CISR information support of the Arctic region as well as in other critical applications of regional socio-economic system risk-management (economic, ecological, personnel, social, political, military, cyber, etc.).

Conclusion

Prevention and control of the regional CISR is a novel and prospective problem domain for researchers and developers in the field of risk analysis of complex systems. Our study shows that today it is a dynamic problem domain, which is characterized by the complication of existing and the emergence of new control problems of regional and higher-level socio-economic systems. These problems are essentially related to the need of accident prevention and security ensuring in the all spheres of public relations that condition on toughening of existing and forming of fundamentally new safety requirements and standards for managing means and technologies of socio-economic system resilience. In our opinion the effectively solving of these problems first of all requires applying and development of network-centric framework to in-

formation support system engineering for management of regional CISR, methods for decentralized control coordination in multi-level distributed safety systems, managerial decision-making processes virtualization technologies based on multi-agent approach, methodology for dynamic model conceptual synthesis of complex systems, implementation mechanisms of intelligent cyber-physical systems, etc. The integration of specified toolkit within the unified instrumental base will provide through-driven design of the sufficient holistic methodological approach to engineering and implementation of information and analytical support tools appropriated to regional CISR management problem-solving.

The proposed background and developed methodology to control, prevention and analysis of regional CISR based on combination and partnering of conceptual, system-dynamic and multi-agent models and methods for decision-making information support provide:

- identification, evaluation and diagnostic situational analysis of the internal and external threats and vulnerability sources of the regional CISR;
- comprehensive risk assessment of regional CISR and prediction of its consequences;
- continuous monitoring and prevention of CISR indicators representing regional critical infrastructure functioning status to the timely threat-driven counteracting and consequence eliminating of its negative impacts on socio-economic development of the region;
- situational awareness analysis and assessment under conditions of uncertainty to selection and coordination of joint control actions under appearing emergency situations;
- synthesis of security management scenarios and formation of guidelines for decision-makers to efficiency enhancement of regional critical infrastructure resilience control and implementation;
- flexible adjustment and automated configuration of knowledge-based decision support systems for CISR management in the framework of regional situational center network.

Further research and developments in the problem domain discussed upon will provide wide opportunities to solve a whole range of specific fundamental and applied problems related to CISR on-line control, prevention, strategic planning and information support both at regional, national and higher levels.

***Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of RAS (project No. 0226-2019-0035). Author thanks Dr. Christer Pursiainen and his colleagues from The Arctic University of Norway (UiT) for research collaboration with Kola Science Center RAS.*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № 0226-2019-0035). Автор выражает благодарность проф. К. Х. Пурсиаину и его коллегам из Арктического университета Норвегии за сотрудничество с Кольским научным центром РАН.

Библиографический список

1. О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ № 683 от 31.12.2015. – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/40391>
2. Ильин, Н. И. Особенности современного этапа создания системы распределенных ситуационных центров в интересах государственного управления Российской Федерации / Н. И. Ильин, Р. М. Юсупов // Информатизация и связь. – 2019. – № 3. – С. 7–13.
3. Маслобоев, А. В. Модель и технология поддержки принятия решений в условиях сетцентрического управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 43–59.
4. Pursiainen, C. Critical infrastructure resilience: A Nordic model in the making? / C. Pursiainen // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2018. – Vol. 27. – P. 632–641.
5. Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/114/oj>
6. CIPedia© – A service of CIPRNet: Critical Infrastructure Protection (CIP) and Critical Infrastructure Resilience (CIR) related issues. – URL: https://websites.fraunhofer.de/CIPedia/index.php/CIPedia%C2%A9_Main_Page
7. Terminology on disaster risk reduction. – URL: <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>
8. Маслобоев, А. В. Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем / А. В. Маслобоев, В. В. Быстров // Экономика. Информатика. – 2020. – Т. 47, № 3. – С. 555–572.
9. Holling, C. S. Resilience and stability of ecological systems / C. S. Holling // Annual Review of Ecology and Systematics, – 1973. – № 4 (1). – P. 1–23.

10. Pimm, S. L. The complexity and stability of ecosystems / S. L. Pimm // *Nature*. – 1984. – № 307 (5949). – P. 321–326.
11. Hosseini, S. A Review of Definitions and Measures of System Resilience / S. Hosseini, K. Barker, J. E. Ramirez-Marequez // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2016. – Vol. 145. – P. 47–61.
12. Francis, R. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems / R. Francis, B. Bekera // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2014. – Vol. 121. – P. 90–103.
13. Resilience-Oriented Urban Planning. Theoretical and Empirical Insights / ed. by Y. Yamagata, A. Sharifi. – Springer Intl. Publ. – 2018. – Vol. 65. – 228 p.
14. Righi, A. W. A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal / A. W. Righi, T. A. Saurin, P. Wachs // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2015. – Vol. 141. – P. 142–152.
15. Evaluation of resilience assessment methodologies / B. Rød, et al. // *Safety and Reliability, Theory and Applications* / ed. by M. Cepin, R. Briš. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – P. 1039–1051.
16. Critical Infrastructure Resilience Index / C. Pursiainen, et. al. // *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice* / ed. by L. Walls, M. Revie and T. Bedford. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – P. 2183–2189.
17. Цыгичко, В. Н. Безопасность критических инфраструктур / В. Н. Цыгичко, Д. С. Черешкин, Г. Л. Смолян. – Москва : Красанд, 2018. – 200 с.
18. Офицеров, А. Концептуальные основы обеспечения комплексной безопасности критически важных объектов / А. Офицеров, О. Басов, С. Бачурин // *Экономика. Информатика*. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 154–163.
19. Шульц, В. Л. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством / В. Л. Шульц, В. В. Кульба, А. Б. Шелков, И. В. Чернов. – Москва : Наука, 2015. – 542 с.
20. Aldrich, P. A. Social Capital and Community Resilience / P. A. Aldrich, M. A. Meyer // *American Behavioural Scientist*. – 2015. – Vol. 59, iss. 2. – P. 254–269.
21. Shishaev, M. Analysis of Online Social Networking When Studying the Identities of Local Communities / M. Shishaev, A. Fedorov, I. Datyev // *Digitalization and Human Security. A Multi-Disciplinary Approach to Cybersecurity in the European High North* / ed. by M. Salminen, G. Zojer, K. Hossain. – Palgrave Macmillan Publ., 2020. – P. 267–295.
22. Social resilience criteria for critical infrastructures during crises / L. Petersen, et al. // IMPROVER D4.1. – 2016. – URL: https://pauljreillydot.files.wordpress.com/2014/04/improver-d4-1-social-resilience-criteria-for-critical-infrastructures-during-crises_draft.pdf
23. Labaka, L. Resilience framework for Critical Infrastructures: An Empirical Study in a Nuclear Plant / L. Labaka, J. Hernantes, J. M. Sarriegi // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2015. – Vol. 141. – P. 92–105.
24. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербakov. – Москва : Наука, 2002. – 303 с.
25. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements / D. Rehaka, et al. // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. – 2019. – Vol. 25. – P. 125–138.
26. Pursiainen, C. Towards Testing Critical Infrastructure Resilience / C. Pursiainen, P. Gattinesi // *Publications Office of the European Union, JRC Scientific and Policy Reports*. – 2014. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38627770.pdf>.
27. Novel methodologies for analyzing critical infrastructure resilience / K. Storesund, et al. // *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World* / ed. by S. Haugen, et al. – 2018. – P. 1221–1229.
28. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities / M. Bruneau, et al. // *Earthquake Spectre*. – 2003. – Vol. 19, № 4. – P. 733–752.
29. Flynn, S. E. America the Resilient: Defying Terrorism and Mitigating Natural Disasters / S. E. Flynn // *Foreign Affairs*. – 2008. – Vol. 83, № 2. – P. 2–8.
30. Zorn, C. R. Post-disaster infrastructure restoration: A comparison of events for future planning / C. R. Zorn, A. Y. Shamseldin // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2015. – Vol. 13. – P. 158–166.
31. Technological resilience concepts applied to critical infrastructure / D. Honfi, et al. // IMPROVER D3.2. – 2017. – URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b12eb01d&appId=PPGMS>
32. Маслобоев, А. В. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : КНЦ РАН, 2016. – 222 с.

References

1. *O Strategii natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: ukaz Prezidenta RF № 683 ot 31.12.2015* [On the National Security Strategy of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 683 of 31.12.2015]. Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/40391> [In Russian]
2. Il'in N. I., Yusupov R. M. *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication]. 2019, no. 3, pp. 7–13. [In Russian]

3. Masloboev A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 43–59. [In Russian]
4. Pursiainen C. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2018, vol. 27, pp. 632–641.
5. *Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection* []. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/114/oj>
6. *CIPedia© – A service of CIPRNet: Critical Infrastructure Protection (CIP) and Critical Infrastructure Resilience (CIR) related issues*. Available at: https://websites.fraunhofer.de/CIPedia/index.php/CIPedia%C2%A9_Main_Page
7. *Terminology on disaster risk reduction*. Available at: <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>
8. Masloboev A. V., Bystrov V. V. *Ekonomika. Informatika* [Economy. Computer science]. 2020, vol. 47, no. 3, pp. 555–572. [In Russian]
9. Holling C. S. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973, no. 4 (1), pp. 1–23.
10. Pimm S. L. *Nature*. 1984, no. 307 (5949), pp. 321–326.
11. Hosseini S. A., Barker K., Ramirez-Marequez J. E. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016, vol. 145, pp. 47–61.
12. Francis R., Bekera B. *Reliability Engineering and System Safety*. 2014, vol. 121, pp. 90–103.
13. *Resilience-Oriented Urban Planning. Theoretical and Empirical Insights*. Ed. by Y. Yamagata, A. Sharifi. Springer Intl. Publ., 2018, vol. 65, 228 p.
14. Righi A. W., Saurin T. A., Wachs P. *Reliability Engineering and System Safety*. 2015, vol. 141, pp. 142–152.
15. Rød B. et al. *Safety and Reliability, Theory and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2017, pp. 1039–1051.
16. Pursiainen C. et al. *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*. Boca Raton: CRC Press, 2017, pp. 2183–2189.
17. Tsygichko V. N., Chereshekin D. S., Smolyan G. L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur* [Critical infrastructure safety and security]. Moscow: Krasand, 2018, 200 p. [In Russian]
18. Ofitserov A., Basov O., Bachurin S. *Ekonomika. Informatika* [Economy. Computer science]. 2020, vol. 47, no. 1, pp. 154–163. [In Russian]
19. Shul'ts V. L., Kul'ba V. V., Shelkov A. B., Chernov I. V. *Stsenarnyy analiz v upravlenii geopoliticheskimi informatsionnymi protivoborstvom* []. Moscow: Nauka, 2015, 542 p. [In Russian]
20. Aldrich P. A., Meyer M. A. *American Behavioural Scientist*. 2015, vol. 59, iss. 2, pp. 254–269.
21. Shishaev M., Fedorov A., Datyev I. *Digitalization and Human Security. A Multi-Disciplinary Approach to Cybersecurity in the European High North*. Palgrave Macmillan Publ., 2020, pp. 267–295.
22. Petersen L. et al. *IMPROVER D4.1*. 2016. Available at: https://pauljreillydot.files.wordpress.com/2014/04/improver-d4-1-social-resilience-criteria-for-critical-infrastructures-during-crises_draft.pdf
23. Labaka L., Hernantes J., Sarriegi J. M. *Reliability Engineering and System Safety*. 2015, vol. 141, pp. 92–105.
24. Polyak B. T., Shcherbakov P. S. *Robastnaya ustoychivost' i upravlenie* [Robust stability and control]. Moscow: Nauka, 2002, 303 p. [In Russian]
25. Rehaka D. et al. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2019, vol. 25, pp. 125–138.
26. Pursiainen C., Gattinesi P. *Publications Office of the European Union, JRC Scientific and Policy Reports*. 2014. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/38627770.pdf>.
27. Storesund K. et al. *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World*. 2018, pp. 1221–1229.
28. Bruneau M. et al. *Earthquake Spectre*. 2003, vol. 19, no. 4, pp. 733–752.
29. Flynn S. E. *Foreign Affairs*. 2008, vol. 83, no. 2, pp. 2–8.
30. Zorn C. R., Shamseldin A. Y. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2015, vol. 13, pp. 158–166.
31. Honfi D. et al. *IMPROVER D3.2*. 2017. Available at: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b12eb01d&appId=PPGMS>
32. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KNTs RAN, 2016, 222 p. [In Russian]

Маслобоев Андрей Владимирович

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра РАН
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Masloboev Andrey Vladimirovich

doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and mathematical
modelling of technological processes
of the Kola Science Centre RAS
(14 Fersmana street, Apatite,
Murmansk region, Russia)

Образец цитирования:

Masloboev, A. V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience / A. V. Masloboev // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 115–130. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-13.

А. И. Мельничук, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

A. I. Mel'nichuk, N. V. Goryachev, N. K. Yurkov

WAYS AND MEANS OF COUNTERING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Аннотация. Беспилотные и дистанционно пилотируемые летательные аппараты (БПЛА и ДПЛА соответственно) уже сегодня нашли широкое применение в различных областях жизнедеятельности человека. БПЛА активно используются в сельском хозяйстве, мониторинге, логистике, контроле за опасными объектами. Но, как часто бывает при техническом прогрессе, передовые разработки начинают активно применяться в военных целях. И сегодня БПЛА, в том числе малые, стали реальной угрозой, не только для военных, но и для мирных граждан. Целью данной работы является обоснование способов и средств противодействия ударным БПЛА, а также оценка поражающей возможности боеприпаса с выбором формы, массы и материала поражающих элементов. Предложена и обоснована концепция универсального боеприпаса, способного обеспечить оперативный ответ на воздушные угрозы техники и личному составу, исходящие от беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: дрон, противодействие, функциональное подавление, беспилотный, аппарат, электромагнитное оружие.

Abstract. Unmanned and remotely piloted aerial vehicles (UAVs and RPVs, respectively) have already found wide application in various areas of human life. UAVs are actively used in agriculture, monitoring, logistics, control of hazardous objects. But, as is often the case with technological progress, advanced developments are beginning to be actively used for military purposes. And today UAVs, including small ones, have become a real threat, not only for the military, but also for civilians. The purpose of this work is to substantiate the methods and means of countering strike UAVs, as well as to assess the destructive capabilities of the ammunition with the choice of the shape, mass and material of the striking elements. The concept of a universal ammunition capable of providing an operational response to air threats to equipment and personnel emanating from unmanned aerial vehicles is proposed and substantiated.

Keywords: drone, countermeasures, functional suppression, unmanned, apparatus, electromagnetic weapons.

В современном мире трудно представить воздушное пространство без беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Стремительно растет количество случаев использования дронов как для государственных целей, так и для частного их использования

Распространенное применение БПЛА обусловлено широким кругом задач, решаемых ими. Постепенно дроны не только вытесняют пилотируемые летательные аппараты (которые используются для поиска очагов пожара, проверки целостности трубопроводов, для обнаружения аварий, заторов на дорогах и реках и т.д.), но и вполне могут найти свое применение в тех областях, которые не входили в сферу интересов авиации ранее (например, доставка малых грузов или в дальнейшем – аэротакси) [1].

Активное развитие рынка БПЛА неотрывно связано с возросшими несчастными случаями, причиной которых является стремительный рост эксплуатируемых дронов [2].

Существующие риски столкновения с пассажирскими летательными аппаратами возле аэродромов, слежки за частной жизнью, возможных падений БПЛА на случайных прохожих, аварий телекоммуникационных и энергетических линий вследствие выхода из строя дронов купируются, как правило, административными барьерами и наказаниями в случае нарушений законодательства [3]. С распространением технологии дронов и их всеобщей доступности появляется угроза их применения как террористическими организациями с целью разведки секретных, охраняемых объектов с последующими диверсиями, контрабандой опасных веществ, нападениями с помощью БПЛА, используемых как транспорт взрывчатых или химических отравляющих веществ, так и в хулиганских

целях. В 2019 г. в Объединенных Арабских Эмиратах произошло возгорание двух крупных месторождений нефти. Причиной возгораний стала атака беспилотных летательных аппаратов. Добыча нефти уменьшилась в два раза, что имело последствия не только в нефтеперерабатывающей промышленности, но и в экономике ряда стран.

В виду преимуществ БПЛА над пилотируемыми летательными аппаратами (более низкая стоимость, отсутствие летного состава, возможность передачи информации в режиме реального времени, создание узкоспециализированных машин) ведется их активная разработка, а также развитие и принятие на вооружение армиями иностранных государств [4].

В соответствии с появившимися вызовами и угрозами безопасности разрабатываются средства противодействия дронам, которые в свою очередь имеют как ряд преимуществ, так и свои недостатки. По большей части тактика борьбы с БПЛА сводится к захвату, постановке помех, уничтожению и выводе из строя [5].

Захват БПЛА может быть выполнен несколькими методами:

1) **захват сетью.** Метод воплощен в жизнь рядом исполнений:

– наземного – выстрелом специальными снарядами. Отрицательный аспект заключается в малой дальности;

– воздушного – выстрелом с БПЛА-охотника. Минус – ограниченное количество выстрелов и быстрое израсходование боеприпасов, после чего должно производиться пополнение на базе; ручное управление и прицеливание;

2) **перехват управления.** К положительным моментам можно отнести безопасность и получение исчерпывающей информации о противнике. К негативным – такой метод не высокоэффективен с дронами, защищенными к перехвату управления.

Принципы уничтожения и способы вывода из строя дронов весьма обширны:

1. Поражение БПЛА огневými средствами с земли или воздуха. Уничтожение производится стрелковым вооружением. Из преимуществ можно отметить универсальность принципа. К недостаткам относятся ведение огня по малозаметной, маневренной цели, что составляет низкую эффективность.

2. Уничтожение БПЛА другим БПЛА либо специальным снарядом (дробью). Очевидным преимуществом является простота реализации. Недостатками данного метода являются обучение оператора-охотника на дрона, сложность попадания, невозможность применения при больших скоплениях людей.

3. Уничтожение огневými средствами артиллерии либо ПВО. К минусам метода относятся – нецелесообразность расходования дорогостоящих средств поражения для уничтожения низкобюджетных дронов.

4. Уничтожение аппарата лазером. Преимуществом данного метода является не только физическое уничтожение беспилотного аппарата, но и постановка помех в области оптического диапазона, вывод из строя оптико-электронной части аппарата. Изъяном данного метода можно признать вес оборудования, сложность конструкции и эксплуатации в полевых условиях.

5. Ликвидация дрона микроволнами (СВЧ-пушки). Превосходство метода заключается в обширной зоне поражения. Недостаток метода заключается в том, что такая система (как и лазер) обладает большими массогабаритными показателями, вследствие чего под воздействие попадают и ее радиоэлектронные системы [6].

6. Уничтожение дронов хищными птицами. К существенным минусам метода относятся реализация метода в стационарном виде, трудности обучения хищных птиц и уход за ними. В условиях современной войны, где решающее значение играет скорость и маневр, такое решение вряд ли окажется эффективным.

7. Воздействие на беспилотный летательный аппарат виркатором. Суть метода заключается в ускорении электронов анодной сеткой. Мощность прибора может достигать от 400 кВт – 4 ГВт. Продолжительность импульса составляет несколько микросекунд. Так как в принцип действия виркатора заложен принцип резонанса, то его действие в силу резонансного принципа носит узкополосный (1–2 % от центрального значения длины волны) и направленный характер (единицы градусов). Габариты составляют приблизительно 2 куб. Скрытность атаки достигается тем, что без специальных приборов атаку невозможно обнаружить. В случае неудачи возможно повторить по-

пытку диверсии. Основной недостаток виркаторов – работа в узком диапазоне частот, большие затраты на необходимый источник мощности.

8. Полупроводниковые генераторы наносекундных импульсных помех. Принцип действия генераторов основан на эффекте SOS (Semiconductor Opening Switch – полупроводниковый размыкатель) – наносекундной коммутации сверхплотных токов в специальных полупроводниковых диодах. Среди преимуществ генераторов данного типа представлены сверхширокополосность, массогабаритные размеры, круговая диаграмма направленности и большая продолжительность излучения [7]. Осуществляется противодействие БПЛА электромагнитным оружием со сверхкоротким электромагнитным импульсом и создание электромагнитного импульса взрывомагнитным генератором. Данный способ основывается на влиянии электромагнитного импульса на радиоэлектронную аппаратуру. Достоинством метода можно считать широкий спектр действия на радиоэлектронную аппаратуру, вследствие чего нарушаются каналы связи и управления, происходит сбой в работе управляющей электроники БПЛА, возможность создания небольших электронно-импульсных снарядов. Также, в зависимости от воздействующего импульса, возможна нелетальность оружия – действие на живые организмы ограничиваются нагреванием определенных органов, изменением психосоматики человека, оказавшегося под воздействием. Действие импульса распространяется и на выключенную аппаратуру. Любая кабель, антенна, провод будет служить проводником разрушающего сигнала уже в самом аппарате, усиливая эффект поражающего воздействия. Даже пару десятков вольт, наведенных на полупроводниковых устройствах, могут вызвать необратимые отказы. Изъяном данного противодействия нужно назвать относительно малую мощность и радиус поражения [8].

9. Выстрел краской по оптическим приборам БПЛА. К позитивным моментам относятся утрата ориентировки оператором дрона, невозможность разведки, сбора информации и прерывание выполнения задания. К отрицательным – БПЛА возможно восстановить и выстрел краской не всегда точен.

Наиболее предпочтительным из приведенных способов можно считать электромагнитный способ (сверхкороткий электромагнитный импульс). Он наиболее эффективен вследствие конструктивных особенностей дронов (корпус выполнен, как правило, из композита и пластика для уменьшения массогабаритных показателей) и его действие распространяется не на конкретную цель, а на определенную площадь.

Идею использования электромагнитного оружия высказал академик Андрей Дмитриевич Сахаров, предложивший создать сверхсильные импульсные магнитные поля так называемыми «взрывомагнитными генераторами» [9].

В настоящее время их спроектировано и создано несколько типов: спиральный, дисковый и т.д. Их действие основано на создании мощного электромагнитного поля в пространстве путем резкого изменения площади, через которую протекает магнитная индукция. Как правило, для быстрого изменения площади применяют заряды взрывчатого вещества, размещенного вокруг катушки и вырабатывающего электромагнитный импульс путем разряда конденсатора. По мнению большинства военных экспертов, электромагнитное оружие на основе излучателей СШП ЭМИ будет являться одним из главных видов оружия в 21 веке. Электромагнитное оружие обладает такими преимуществами, как скрытность, эффективность, избирательность воздействия, гуманность.

Таким образом, существует множество способов борьбы с дронами, но каждый конкретный способ имеет свои достоинства и недостатки. Целесообразно объединить несколько путей решения данной проблемы, которые бы дополняли друг друга, перекрывая все изъяны, как это сделано в работах [16, 17]. Исходя из реалий развития дронов, можно предположить, что средства противодействия должны обладать способностями борьбы как с отдельными БПЛА, так и действующими согласованно в группах, например, сочетание взрывного магнитного генератора, краски и графитовой пыли в одном заряде либо виркатора, взрывного магнитного генератора, гранаты для уничтожения простыми огневыми средствами.

Для оценки поражающей возможности боеприпаса целесообразно рассмотреть каждый вид поражающего фактора отдельно.

Оценку поражающих возможностей гранаты или мины рационально произвести в зависимости от ее типа. В настоящее время промышленностью выпускаются несколько видов гранат: осколочного типа и с готовыми поражающими элементами.

Для оценки выбора типа снаряда, массы и количества поражающих элементов необходимо произвести расчеты, принимая некоторые математические допущения.

Необходимо принять во внимание тот факт, что тип снаряда должен определяться не только своим поражающим действием по цели, но и его возможностью универсального применения как по воздушным, так и по наземным целям. Тактическая обстановка боя диктует необходимость в оперативном ответе на воздушные угрозы техники и личного состава, исходящие в том числе и от дронов, попадание даже одного осколка для которых может быть критично, несущих различные заряды взрывчатого вещества. Таким вариантом универсального боеприпаса мог бы стать 57-мм снаряд, исходя из того, что почти вся легкая бронетехника создается из расчета устойчивости к 30-мм автоматическим пушкам. Подобный боеприпас также применялся и в ПВО (примером можно считать ЗСУ-57-2) [10–13].

При взрыве образуется сфера поражения с равномерно распределенными осколками, чем больше дрон, тем большая вероятность его поразить на удалении от взрыва боеприпаса.

Для простоты расчетов примем высоту и ширину беспилотного летательного аппарата за 0,5 м (чем больше размер БПЛА, тем легче поразить его), тогда площадь возможного поражения составит 0,25 м², чем больше аппарат, тем вероятнее его поразить и на более удаленных расстояниях.

Для расчета потребного количества осколков с вероятностью поражения 100 % площадь промежуточных разлета осколков должна быть 2,5 м²:

$$0,25 / 0,1 = 2,5 .$$

Тогда потребное количество осколков

$$N = \frac{4\pi R^2}{2,5} .$$

Наиболее эффективны осколки массой 2–5 г. Учитывая это,

$$N = \frac{4\pi R^2}{2,5} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 3^2}{2,5} = 45,216 \approx 45 .$$

Оценим количество осколков, образующихся после взрыва (осколки весят от 2 до 5 г, при этом масса корпуса боеприпаса, образующего осколки, должна быть в пределах 135 г):

$$R = \sqrt[2]{\frac{S_{ц} M_{м}}{4\pi K m_0}} ,$$

R – расчетный радиус поражения; $S_{ц}$ – площадь проекции цели (БПЛА – 0,25 кв.м.); $M_{м}$ – масса корпуса гранаты, образующая осколки; $K_{п}$ – коэффициент поражения для вероятности в 90 %; m_0 – расчетная масса одного осколка [14, 15].

Стандартный осколочный снаряд (поражающий большим числом однотипных поражающих элементов) 57 мм имеет массу 2,8 кг, учитывая этот факт:

$$R_1 = \sqrt[2]{\frac{S_{ц} M_{м}}{4\pi K m_0}} = \sqrt[2]{\frac{0,25 \cdot 2800}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,9 \cdot 3}} \approx 5 \text{ м} .$$

Таким образом, радиус сплошного поражения осколочной гранатой с 90 %-й возможностью попадания лежит на расстоянии цели от подрыва снаряда в 5 м.

Для оценки параметров взрыва снаряда применяются стандартные осколочные цилиндры для определения метательных и дробящих свойств.

Получаемая максимальная скорость осколками в случае сферической симметрии найдем из уравнения Покровского – Гарни:

$$V_0 = 0,5\varphi_0 D \sqrt{\frac{5\alpha}{10 - 4\alpha}} ,$$

где D – скорость детонации заряда, м/с; φ_0 – для оболочки заданного дробления $\varphi_0 = 0,90 \dots 0,95$;
 $\alpha = \frac{m_{\text{вв}}}{M}$; $m_{\text{вв}}$ – масса; M – масса корпуса снаряда, образующая осколки.

Для тротила $D = 6950$, масса оболочки снаряда – 2,8 кг, масса взрывчатого вещества – 0,153 кг

$$V_0 = 0,5 \cdot 0,93 \cdot 6950 \sqrt{\frac{5 \cdot 0,2732}{10 - 4 \cdot 0,2732}} \approx 540 \text{ (м/с)}.$$

Для дальнейших расчетов переведем в км/с: 540 м/с = 0,54 км/с.

Общее количество осколков, образующихся при подрыве, возможно вычислить из формулы

В. А. Одинцова

$$N_{0,5} = K \frac{\alpha}{\Psi} d_0 D^2,$$

D – скорость детонации заряда, км/с; $\alpha = \frac{m_{\text{вв}}}{M}$ – коэффициент наполнения; $m_{\text{вв}}$ – масса; M – масса корпуса снаряда, образующая осколки; Ψ – относительное сужение материала оболочки при взрыве (для стали С-60 согласно ГОСТ 1050-2013 равен 35); d_0 – внешний диаметр оболочки при взрыве, дм; K – коэффициент, зависящий от геометрической формы оболочки (принят равным 80)

$$N_{0,5} = K \frac{\alpha}{\Psi} d_0 D^2;$$

$$N_{0,5} = 80 \cdot \frac{0,2732}{35} \cdot 57 \cdot 6,950^2 \approx 1719.$$

Для оценки пробития (механизмов взаимодействия осколков с преградами) цели в диапазоне скоростей до 2000 м/с воспользуемся переходной схемой, в которой используется критерий удельного импульса $i = mv_0/(S) \geq i_{\text{кр}}$, критическое значение удельного импульса линейно зависит от толщины преграды

$$i_{\text{кр}} = i_h h_{\text{пр}}.$$

Для пары сталь-дюраль (наиболее частый применяемый в авиации материал для создания крыла и фюзеляжа)

$$\frac{h_{\text{пр}}}{m^{1/3}} = \frac{v}{66\Phi}, \quad V_{\text{псп}} = \frac{66h_{\text{д}}^3\Phi}{m^{1/3}},$$

где $h_{\text{пр}}$ – в мм; m – в г, v_0 – в км/с; $V_{\text{псп}}$ – предельная скорость пробития $\Phi = 1,38$.

Таблица 1

Форма тела	Φ
Шар	1,31
Цилиндр	
$L/d = 1$	1,38
$L/d = 1$	1,45
Тетраэдр	1,80
Октаэдр	1,43
Куб	1,50
Параллелепипед	
$1 \times 1 \times 2$	1,58
$1 \times 1 \times 8$	2,13
$1 \times 1 \times 2$	1,59
$1 \times 2 \times 4$	1,89

При компактной форме ударника в виде цилиндра 1:1 ($\Phi = 1,38$, табл. 1) для пары «сталь-дюраль» получим

$$\frac{h_{np}}{m^{1/3}} = 9,7v_0,$$

откуда

$$h_{np} = 9,7V_0 m^{1/3};$$

$$h_{np} = 9,7 \cdot 0,54m^{1/3}.$$

Ниже приведена табл. 2 толщины пробития в мм в зависимости от массы осколка в граммах при расчетной начальной скорости.

Таблица 2

$m_{оск}, \Gamma$	$h_{пр}, \text{мм}$
3	7,56
5	8,96
8	10,48
16	13,2
32	16,63
64	20,95
128	26,40

Произведем расчет убойного интервала (расстояния от места взрыва, на котором осколок еще сохраняет скорость, необходимую для поражения цели – убойную скорость)

$$I_{уб} = 145 \frac{m^{1/3}}{C_x \Phi} \lg \frac{V_0}{V_{уб}},$$

где $I_{уб}$ – убойный интервал, м; m – масса осколка; C_x – коэффициент лобового сопротивления (для оценки принят 1,21); Φ – параметр формы осколка (принят 1,38); $V_{уб}$ – убойная скорость осколка, при тех же допущениях:

$$V_{уб} = 145 \frac{h_{ст}^3 \Phi}{m^{1/3}},$$

где $h_{ст}^3$ – стальной эквивалент цели, мм, принят равным 2 мм; Φ – параметр формы осколка (принят 1,38); m – в г.

Таблица убойной скорости и убойного интервала для осколков с различным весом представлена ниже (табл. 3).

Таблица 3

$m_{оск}, \Gamma$	$V_{уб}, \text{м}$	$I_{уб}, \text{м}$
3	277,483	36,214
5	234,038	53,917
8	200	74,879
16	158,819	116,298
32	126,055	174,19
64	100,05	254,392
128	79,41	364,336

Исходя из вычислений целесообразно выбрать форму осколков, имеющих геометрическую форму параллелепипеда весом 3–5 г. Дробление осколков одинаковой массы и формы может быть

обеспечено проточками стенок по выбранным сечениям (предположительно согласно выбранной форме). Для более совершенного регулярного дробления предлагается выбрать способ проточки поверхностей с двух сторон (часто в случае проточки лишь одной поверхности осколкообразование происходит не по проточкам).

Библиографический список

1. Балаганский, И. А. Действие средств поражения и боеприпасов : учебник / И. А. Балаганский, Л. А. Мерзневский. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 408 с.
2. Велихов, Е. П. Космическое оружие: дилемма безопасности / Е. П. Велихов, А. Г. Арбатов, А. А. Васильев. – Москва : Мир, 1986. – 182 с.
3. Ganzienko, O. 15 профессий для летающих дронов / O. Ganzienko. – URL: <https://geektimes.ru/company/robhunter/blog/251636/> (дата обращения: 27.04.2019).
4. Солодов, А. В. Физические механизмы повреждения интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Солодов А. В. – Москва, 2011. – 11 с.
5. Адамов, А. П. Анализ эксплуатации мультикоптеров с позиции надежности и безопасности / А. П. Адамов, А. А. Адамова, Н. В. Герасимов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-13.
6. Матвейчук, В. В. Взрывное дело (Внимание, взрыв) : учеб.-практ. пособие / В. В. Матвейчук. – Москва : Академический Проект, 2005. – 512 с.
7. Физика взрыва : в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, исправ. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – Т. 2. – 656 с.
8. Рябов, К. О борьбе с беспилотными летательными аппаратами / К. Рябов. – URL: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami.html> (дата обращения: 27.04.2019).
9. Государственная регистрация и государственный учет воздушных судов : Воздушный кодекс РФ № 60-ФЗ от 19 марта 1997 г. – Ст. 33.
10. Самутина, А. В. Рынок дронов: состояние и перспективы / А. В. Самутина // Синергия наук. – 2016. – № 6. – С. 111–121.
11. Сахаров, А. Д. Взрывомагнитные генераторы / А. Д. Сахаров // Успехи физических наук. – 1966. – № 4.
12. Фомичев, К. И. Электромагнитное оружие. Перспективы применения в информационной борьбе / К. И. Фомичев, Л. М. Юдин // Электроника: наука, технология, бизнес. – 1999. – № 6. – URL: <https://electronics.ru>
13. Хлуновская, Е. А. Специфичность влияния сверхвысокочастотного импульсно-модулированного электромагнитного поля на вызванные потенциалы зрительной, слуховой и соматоторной коры мозга кошки при стимуляции светом и звуком / Е. А. Хлуновская, Л. Ф. Слепченко // Биофизика. – 1995. – Т. 40, вып. 2.
14. Концепция создания нового артиллерийского комплекса на базе легкой 57-мм автоматической пушки // Журнал ОТ. – 2006. – № 3/4. – URL: <https://kanchukov-sa.livejournal.com>
15. Патент России RU 2700206C1 Способ двухфакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, Е. А. Кузина. – Заявл. 13.09.2019 ; зарег. 13.09.2019, Бюл. № 26.
16. Патент России RU 2700207C1 Способ функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, Е. А. Кузина. – Заявл. 13.09.2019 ; зарег. 13.09.2019, Бюл. № 26.

References

1. Balaganskiy I. A., Merzhnevskiy L. A. *Deystvie sredstv porazheniya i boepripasov: uchebnik* [Action of weapons of destruction and ammunition: textbook]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004, 408 p. [In Russian]
2. Velikhov E. P., Arbatov A. G., Vasil'ev A. A. *Kosmicheskoe oruzhie: dilemma bezopasnosti* [Space weapons: the security dilemma]. Moscow: Mir, 1986, 182 p. [In Russian]
3. Ganzienko O. *15 professiy dlya letayushchikh dronov* [15 professions for flying drones]. Available at: <https://geektimes.ru/company/robhunter/blog/251636/> (accessed 27.04.2019). [In Russian]
4. Solodov A. V. *Fizicheskie mekhanizmy povrezhdeniya integral'nykh mikroskhem v elektromagnitnykh polyakh impul'snogo radioizlucheniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Physical mechanisms of damage to integrated circuits in electromagnetic fields of pulsed radio emission: abstract. ... candidate of technical sciences]. Moscow, 2011, 11 p. [In Russian]
5. Adamov A. P., Adamova A. A., Gerasimov N. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3 (19). DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-13. [In Russian]
6. Matveychuk V. V. *Vzryvnoe delo (Vnimanie, vzryv): ucheb.-prakt. posobie* [Explosive business (Attention, explosion): an educational and practical guide]. Moscow: Akademicheskii Proekt, 2005, 512 p. [In Russian]
7. *Fizika vzryva: v 2 t.* [Explosion Physics : in 2 vol.]. Ed. by L. P. Orlenko. 3rd ed. rev. Moscow: FIZMATLIT, 2004, vol. 2, 656 p. [In Russian]

8. Ryabov K. *O bor'be s bespilotnymi letatel'nymi apparatami* [On the fight against unmanned aerial vehicles]. Available at: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatel'nymi-apparatami.html> (accessed 27.04.2019). [In Russian]
9. *Gosudarstvennaya registratsiya i gosudarstvennyy uchet vozдушnykh sudov: Vozдушnyy kodeks RF № 60-FZ ot 19 marta 1997 g. St. 33.* [State Registration and State Registration of Aircraft : Air Code of the Russian Federation No. 60-FZ dated March 19, 1997. – Article 33]. [In Russian]
10. Samutina A. V. *Sinergiya nauk* [Synergy of sciences]. 2016, no. 6, pp. 111–121. [In Russian]
11. Sakharov A. D. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in the physical sciences]. 1966, no. 4. [In Russian]
12. Fomichev K. I., Yudin L. M. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, technology, business]. 1999, no. 6. Available at: <https://electronics.ru> [In Russian]
13. Khlunovskaya E. A., Slepchenko L. F. *Biofizika* [Biophysics]. 1995, vol. 40, iss. 2. [In Russian]
14. *Zhurnal OT* [The journal of OT]. 2006, no. 3/4. Available at: <https://kanchukov-sa.livejournal.com> [In Russian]
15. *Patent Rossii RU 2700206C1 Sposob dvukhfaktornogo funktsional'nogo podavleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Russian patent RU 2700206C1 Method of two-factor functional suppression of an unmanned aerial vehicle]. N. K. Yurkov, N. V. Goryachev, E. A. Kuzina. Appl. 13.09.2019; reg. 13.09.2019, Bull. no. 26. [In Russian]
16. *Patent Rossii RU 2700207C1 Sposob funktsional'nogo podavleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Russian patent RU 2700207C1 Method of functional suppression of an unmanned aerial vehicle]. N. K. Yurkov, N. V. Goryachev, E. A. Kuzina. Appl. 13.09.2019; reg. 13.09.2019, Bull. no. 26. [In Russian]

Мельничук Антон Иванович

инженер группы обслуживания и ремонта
бортовой контрольно-записывающей аппаратуры,
Учебная авиационная база
Краснодарского высшего военного
авиационного училища летчиков МО РФ
(Россия, Саратовская область,
г. Ртищево, ул. Котовского 1/1)
E-mail: pelmenio@mail.ru

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Mel'nichuk Anton Ivanovich

engineer of the service and repair group
of on-board recording equipment training,
Aviation Base of the Krasnodar Higher Military
Aviation School of Pilots
of Russian Ministry of Defense
(1/1 Kotovsky street, Rtishchevo,
Saratov Region, Russia)

Goryachev Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratievich

doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design and
production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Мельничук, А. И. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам / А. И. Мельничук, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 131–138. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-14.

Д. А. Елинов, О. В. Бирюкова, М. В. Чернецов, Э. В. Лапшин, Л. А. Тюрина

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

D. A. Elinov, O. V. Biryukova, M. V. Chernetsov, E. V. Lapshin, L. A. Tyurina

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES OF USING SOLAR POWER PLANTS TO GENERATE ELECTRICITY IN THE PENZA REGION

Аннотация. *Актуальность и цели.* Борьба с глобальным потеплением и ограничение техногенного воздействия на окружающую среду являются одними из важнейших задач, стоящих перед человечеством. Согласно прогнозам, температура на планете к 2100 г. может подняться на 4 °С. Серьезность проблемы подтверждается рядом международных документов и соглашений, содержащих меры по ограничению выбросов парниковых газов. В частности, в рамках 21-й Международной конференции по климату, прошедшей в Париже, было принято соглашение, поставившее целью не допустить повышения температуры на планете более чем на 2 °С. Решением, позволяющим снизить выброс парниковых газов в атмосферу, может стать использование возобновляемых источников электроэнергии, в частности солнечных электростанций. *Материалы и методы.* В работе использовались статистические данные по солнечной обстановке в Пензенской области. Проведено сравнение с существующими объектами возобновляемой энергетики на солнечных элементах, расположенными в схожих условиях по уровню инсоляции. Приведена оценка экономической обоснованности использования энергии солнца для генерации электроэнергии на территории Пензенской области. Даны рекомендации по техническому исполнению солнечных электростанций на территории Пензенской области, определено оптимальное значение коэффициента покрытия. *Результаты.* Предложенная методика оценки конструктивных параметров солнечных электростанций может быть применена при строительстве СЭС для повышения эффективности. Адекватность используемой методики подтверждается соответствием полученных результатов данным по действующим ветровым турбинам. *Выводы.* В результате проведенного анализа выявлено, что Пензенская область обладает достаточным потенциалом для строительства солнечных электростанций, но при существующих ценах на электроэнергию требуется значительное уменьшение стоимости строительства электростанций для достижения экономической эффективности.

Abstract. *Background.* The fight against global warming, and the restriction of technogenic impact on the environment are some of the most important tasks facing mankind. It is predicted that global temperatures could rise by 4 °C by 2100. The seriousness of the problem is confirmed by a number of international instruments and agreements containing measures to limit greenhouse gas emissions. In particular, in the framework of the 21 th International Conference on Climate, held in Paris was made an agreement, it aims to prevent the rise in temperature on the planet by more than 2 °C. Solutions to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere, could be the use of renewable energy sources, such as solar plants. *Materials and methods.* In paper used statistical data on the solar situation in the Penza region. A comparison is made with existing renewable energy facilities based on solar cells located in similar conditions in terms of insolation. An assessment of the economic feasibility of using solar energy to generate electricity in the Penza region. Recommendations on the technical performance of solar power plants in the Penza region are given, the optimal value of the coverage coefficient is determined. *Results.* The proposed methodology for assessing the design parameters of solar power plants can be applied in the construction of solar power plants to improve efficiency. The adequacy of the methodology used is confirmed by the correspondence of the obtained results to the data on existing wind turbines. *Conclusions.* The analysis revealed that the Penza region has sufficient potential for the construction of solar power plants, but at current electricity prices, a significant reduction in the cost of building power plants is required to achieve econ.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, возобновляемая энергетика, солнечные электростанции, экономическая эффективность, оптимизация.

Keywords: alternative energy sources, renewable energy, solar power plants, economic efficiency, optimization.

Актуальность

Борьба с глобальным потеплением и ограничение техногенного воздействия на окружающую среду являются одними из важнейших задач, стоящих перед человечеством. Согласно прогнозам [1], температура на планете к 2100 г. может подняться на 4 °С. Серьезность проблемы подтверждается рядом международных документов и соглашений, содержащих меры по ограничению выбросов парниковых газов. В частности, в рамках 21-й Международной конференции по климату, прошедшей в Париже, было принято соглашение, поставившее целью не допустить повышения температуры на планете более чем на 2 °С. При этом основным путем достижения этой цели является снижение выбросов парниковых газов в атмосферу странами-подписантами. На рис. 1 приведены объемы выбросов парниковых газов по отраслям в Российской Федерации согласно данным отчетов [2].

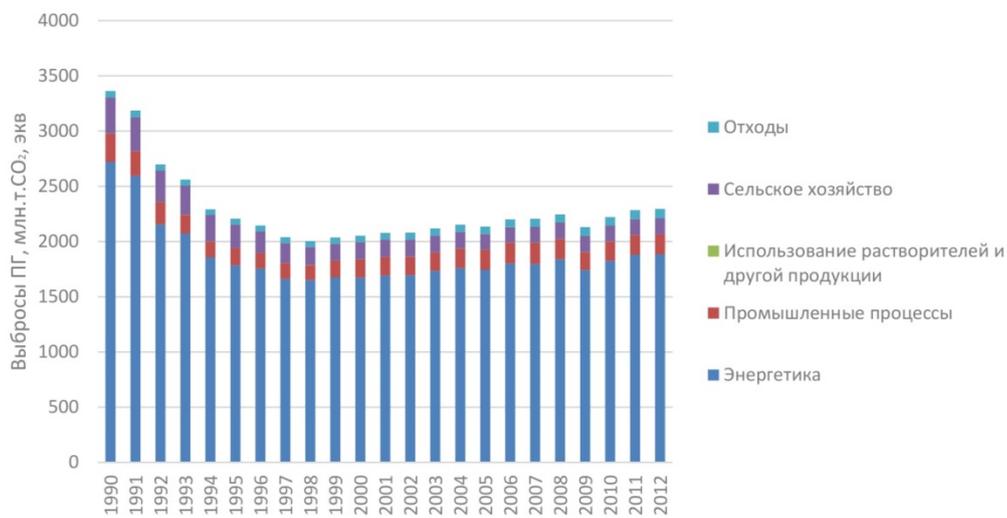


Рис. 1. Объемы выбросов парниковых газов по отраслям в 1990–2012 гг.

Таким образом доля выбросов парниковых газов наиболее существенна в энергетике и составляет порядка 80 % от общего объема выбросов по стране. Следовательно, производство энергии играет основную роль в загрязнении окружающей среды парниковыми газами и является наиболее перспективной областью для внедрения инноваций, снижающих выбросы. На рис. 2 приведены данные по разным странам [3], показывающие объем выброса парниковых газов при производстве МВт · ч электроэнергии.

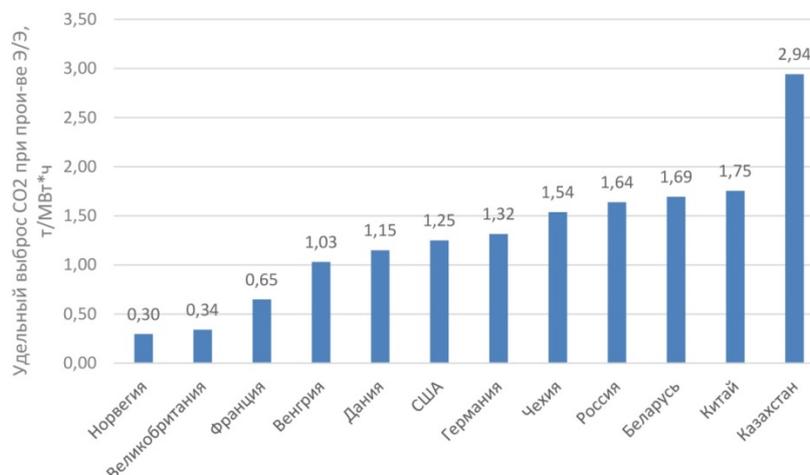


Рис. 2. Удельный выброс CO₂ при производстве электроэнергии

Решением, позволяющим снизить выброс парниковых газов в атмосферу, может стать использование возобновляемых источников электроэнергии. На рис. 3 приведены показатели выброса парниковых газов при производстве электроэнергии на различных типах электростанций [4].

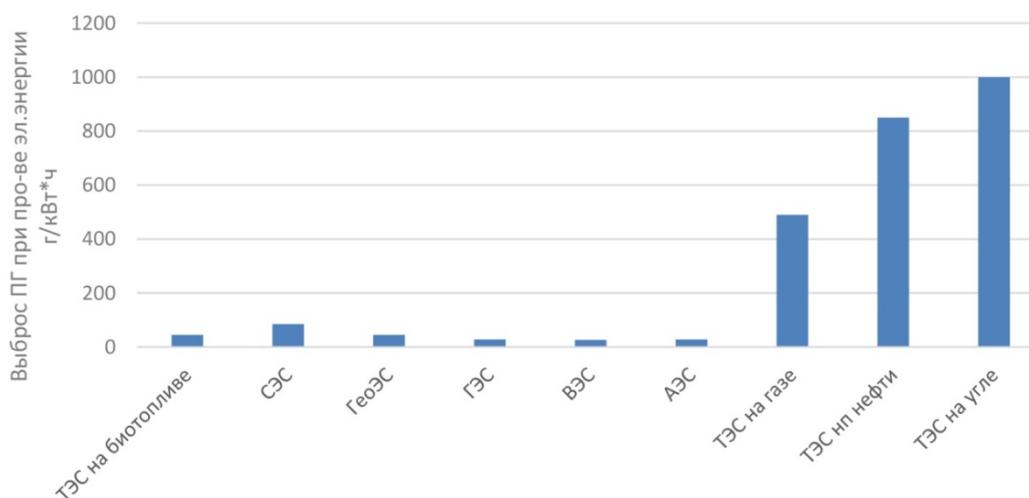


Рис. 3. Количество парниковых газов, выбрасываемых в окружающую среду при производстве электроэнергии

Таким образом, рассмотрение возможности применения электростанций на возобновляемых источниках электроэнергии представляется актуальной задачей.

Структура генерации электрической энергии в Пензенской области

На территории Пензенской области расположены следующие электростанции:

- 1) ТЭЦ-1, установленная мощность 385 МВт;
- 2) ТЭЦ-2, установленная мощность 16 МВт;
- 3) ТЭЦ-3, установленная мощность 4 МВт.

При этом максимальное потребление электрической мощности в 2015 г., согласно данным системного оператора [5], составило 828,4 МВт. Выработка электроэнергии составила 2511,7 млн кВт · ч, потребление – 8075 млн кВт · ч.

Таким образом, установленная мощность генераторов в Пензенской области покрывает 49 % пикового потребления, а собственная генерация покрывает только 31 % от нужд энергопотребления. Следовательно, регион является энергодефицитным и развитие собственной генерации является актуальной задачей. Кроме того, вся генерация осуществляется на электростанциях на невозобновляемых источниках электроэнергии.

Анализ солнечных ресурсов Пензенской области

Карта распределения интенсивности солнечной радиации (ИСР) по территории Пензенской области приведена на рис. 4. Карта составлена по данным, взятым из аналитических сборников [6]. Также с сайта NASA [7] были взяты данные по уровню ИСР для января и июля (рис. 5). Среднегодовые уровни радиации составляют 3,4 кВт · ч · м²/день. Таким образом, чтобы обеспечить выработку электроэнергии СЭС на уровне выработки всеми электростанциями Пензенской области, учитывая эффективность солнечного элемента на уровне 20 %, требуется площадь 10 км². Учитывая то, что 70 % земель земельного фонда Пензенской области составляют земли сельскохозяйственного назначения, то использование части этих земель под СЭС представляется перспективным.

Наилучшие условия по уровню солнечной радиации находятся на юго-востоке области. Для дальнейших изысканий будем брать расчетную точку 1(T1) с координатами 52,5 с.ш., 46,0 в.д. С сайта NASA [7] получены данные по средней ИСР за 22 года по месяцам. В качестве точки (T2), с которой производится сравнение, возьмем точку с координатами 52,4 с.ш., 14,5 в.д. (Нойхарденберг, рис. 6), где расположена одна из крупнейших СЭС мира, с установленной мощностью 145МВт. Полученные данные сведены в табл. 1.

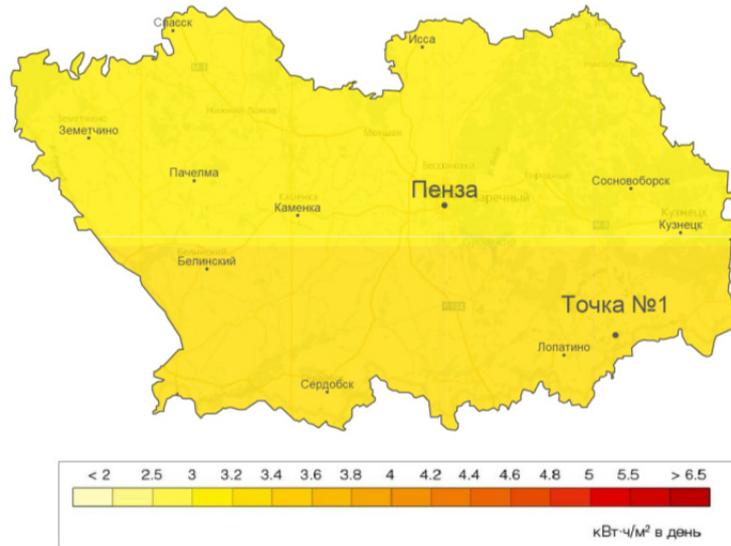


Рис. 4. Средняя за год суточная норма солнечной радиации

NASA Surface meteorology and Solar Energy: Data Subset



January Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m²/day)

	42	43	44	45	46	47
54	0.79	0.79	0.78	0.78	0.78	0.78
53	0.86	0.86	0.87	0.87	0.89	0.89
52	0.94	0.94	0.96	0.96	0.95	0.95

July Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m²/day)

	42	43	44	45	46	47
54	5.59	5.59	5.56	5.56	5.60	5.60
53	5.70	5.70	5.69	5.69	5.70	5.70
52	5.83	5.83	5.88	5.88	5.92	5.92

Рис. 5. Данные по уровню солнечной радиации в Пензенской области в январе и июле



Рис. 6. СЭС в Нойхарденберге

Таблица 1

Данные по среднемесячной инсоляции

Месяц	ИСП Т1 – 52,5 с.ш., 46,0 в.д. (Пенз.обл.)	ИСП Т2 – 52,4 с.ш., 14,5 в.д. (Нойхарденберг)	Относительный прирост уровня ИСП $(I_{T1}-I_{T2})/I_{T2}$, %
Январь	0,95	0,80	18.8
Февраль	1,79	1,51	18.5
Март	3,11	2,46	26.4
Апрель	4,34	3,73	16.4
Май	5,79	4,83	19.9
Июнь	6,14	4,84	26.9
Июль	5,92	4,82	22.8
Август	5,00	4,59	8.9
Сентябрь	3,31	2,79	18.6
Октябрь	1,89	1,64	15.2
Ноябрь	1,07	0,83	28.9
Декабрь	0,73	0,60	21.7

Таким образом, уровень инсоляции на юго-востоке Пензенской области превышает уровень инсоляции в Нойхарденберге в среднем на 20 %. Следовательно, можно сделать вывод, что Пензенская область обладает необходимыми солнечными ресурсами для постройки СЭС. Для дальнейшего анализа требуется произвести исследование технической стороны построения СЭС на территории Пензенской области.

Технические вопросы построения СЭС на территории Пензенской области

При реализации проектов СЭС выделяют следующие этапы [8]:

- разработка концепции и определение расположения СЭС;
- предварительное технико-экономическое обоснование;
- технико-экономическое обоснование;
- получение разрешений, определение финансирования и заключение контрактов;
- проектирование, строительство и коммерческая эксплуатация.

На этапе разработки концепции определяются место расположения СЭС, тип и мощность СЭС, ожидаемый объем и себестоимость выработки электроэнергии, ожидаемый доход.

Для повышения выработки электроэнергии с солнечных модулей их следует располагать в плоскости перпендикулярной направлению на Солнце. Для осуществления слежения за Солнцем используются специальные системы наводки солнечных панелей по азимуту и по углу наклона к земной поверхности. Но при этом появляется проблема, обусловленная затенением панелей друг другом в различное время суток (рис. 7). В целях упрощения оценки примем, что панели СЭС будут ориентированы в южном направлении и управляться они будут только по углу наклона. Регулировка угла наклона будет осуществляться в пределах, обусловленных высотой Солнца над горизонтом в различное время года.

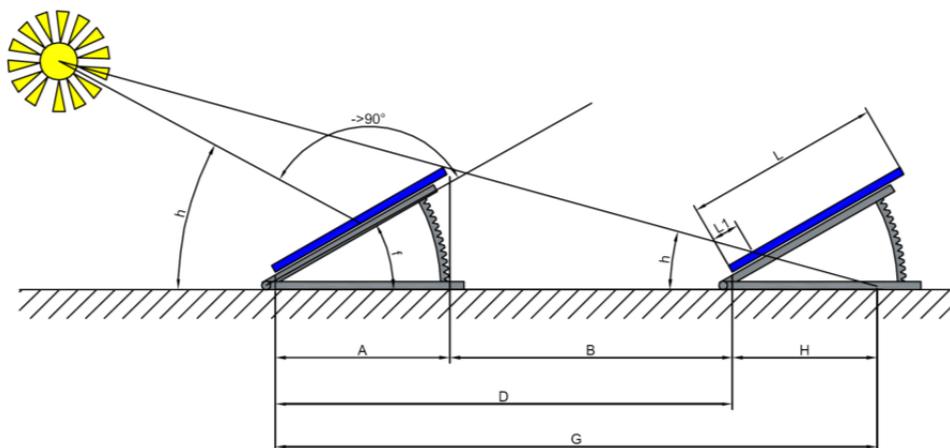


Рис. 7. Влияние угла наклона солнечной панели на затенение соседнего ряда панелей

Высота Солнца над горизонтом зависит от склонения Солнца в данный момент времени и от географической широты места наблюдения. Склонение Солнца можно определить по следующей формуле:

$$\delta = -23,44 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (N + 10)\right), \tag{1}$$

где N – количество дней, отсчитанных от 1-го января.

Высота Солнца над горизонтом в северном полушарии определяется по выражению

$$h = 90 - Lat + \delta, \tag{2}$$

где Lat – географическая широта.

Согласно рис. 7 значение угла наклона f будет определяться как

$$f = 90 - h. \tag{3}$$

Длина области затенения (G) будет определяться по выражению

$$G = \frac{L}{\cos(f)} = KL, \tag{4}$$

где L – длина солнечной батареи, $K = 1/\cos(f)$.

Длина затененного участка солнечной батареи в соседнем ряду ($L1$) будет определяться по выражению:

$$L1 = H \cdot \cos(f) = (G - D) \cos(f) = L - D \cos(f). \tag{5}$$

При этом если преобразовать выражение (5) для относительных величин, то получим

$$K_s = 1 - \frac{D}{L} \cos(f) = 1 - GCR^{-1} \cos(f), \tag{6}$$

где K_s – коэффициент затенения ($K_s = L1/L$); GCR – коэффициент покрытия [9].

Приняв значение $K_s = 0$ из выражения (6), можно получить значение GCR для заданного угла наклона:

$$GCR = \cos(f). \tag{7}$$

Следует также отметить, что при расположении солнечной батареи в плоскости перпендикулярной направлению на Солнце, интенсивность солнечной радиации через поверхность элемента изменится по выражению

$$I_e = KI_g, \tag{8}$$

где I_e – ИСР на единицу площади элемента; I_g – ИСР на единицу площади на уровне земли; $K = 1/\cos(f)$.

По выражениям 2, 3, 7, 8 были получены значения величин h, f, GCR, I_e по месяцам для географической точки П1. Результаты вычислений сведены в табл. 2

Таблица 2

Месяц	Склонение δ , град	Высота Солнца h , град	Угол наклона панели f , град	GCR	ИСР на элементе I_e , кВт · ч/м ² в день
Январь	-21,30	16,20	73,80	0,28	3,41
Февраль	-13,70	23,80	66,20	0,40	4,43
Март	-2,92	34,58	55,42	0,57	5,48
Апрель	9,32	46,82	43,18	0,73	5,95
Май	18,96	56,46	33,54	0,83	6,95
Июнь	23,29	60,79	29,21	0,87	7,03
Июль	21,39	58,89	31,11	0,86	6,91
Август	13,53	51,03	38,97	0,78	6,43
Сентябрь	2,32	39,82	50,18	0,64	5,17
Октябрь	-9,87	27,63	62,37	0,46	4,08
Ноябрь	-19,08	18,42	71,58	0,32	3,39
Декабрь	-23,35	14,15	75,85	0,24	2,99

Из полученных результатов видно, что при разбивке поля солнечных элементов для зимнего времени на каждый метр панели требуется 4 м расстояния между рядами, а для летнего времени будет достаточно принять на каждый метр панели 1,15 м между рядами. При этом следует отметить, что если принять расстояние между рядами по зимнему времени, то в летние месяцы будет наблюдаться недобор мощности за счет неполного покрытия поля солнечными элементами, если же принять расстояние между рядами по летнему времени, то в зимние месяцы будет наблюдаться снижение вырабатываемой мощности за счет затенения солнечных элементов разных рядов.

Для решения задачи оптимального выбора расстояния между рядами солнечных элементов предлагается ввести величины потерь от недоиспользования участка (Los_o) и потерь от затенения (Los_s). Очевидно, что потери от недоиспользования будут наблюдаться при соблюдении условия $G < D$, а потери от затенения будут наблюдаться при условии $G > D$. При этом потери затенения будут обусловлены затенением некоторого участка $L1$ солнечной батареи в соседнем ряду. Учитывая вышесказанное, можно записать выражения для Los_o и Los_s в следующем виде:

$$\begin{aligned} Los_o &= (D - G)I_g = (D - LK)I_g; \\ Los_s &= L1 \cdot KI_g = (L - D \cos(f))KI_g = (LK - D)I_g. \end{aligned} \tag{9}$$

При этом если осуществить деление каждого из выражений (9) на величину D , то они преобразуются к следующему виду:

$$\begin{aligned} Los_o &= (1 - K \cdot GCR)I_g; \\ Los_s &= (K \cdot GCR - 1)I_g. \end{aligned} \tag{10}$$

В выражениях (10) D в левой части не записывается, так как она не влияет на дальнейший анализ. Очевидно, что выражения (10) обратны друг другу и в сумме всегда будут давать ноль. Поэтому для дальнейшего анализа вместо критерия минимума суммы потерь предлагается использовать следующий критерий:

$$S = \sum_{i=1}^{12} |Los_{o,i}| \rightarrow \min. \tag{11}$$

Результаты расчетов значения S в зависимости от значения коэффициента GCR приведены на рис. 8. Значения коэффициентов GCR взяты из табл. 2.

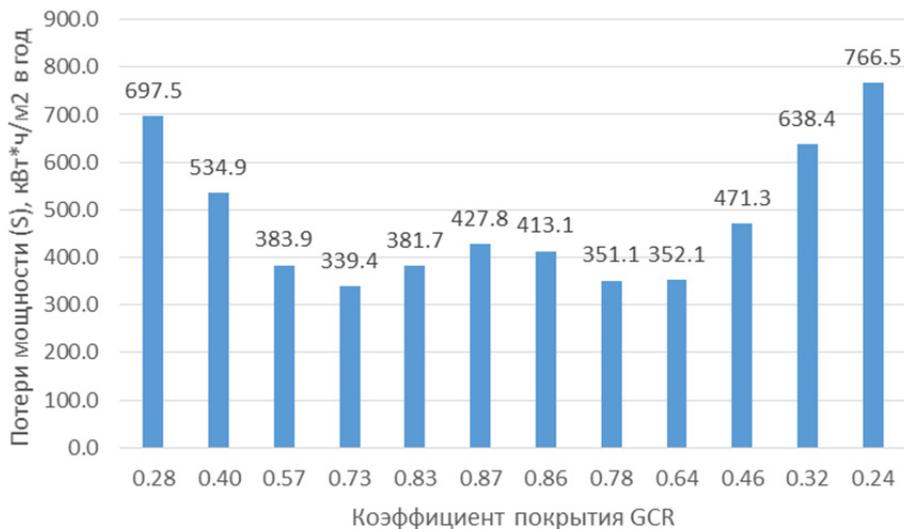


Рис. 8. Сумма потерь генерируемой мощности в год при различных коэффициентах GCR

Как видно из полученных данных, наименьшие потери генерации получаются при значении коэффициента покрытия GCR равном 0,73. Таким образом на каждый метр солнечной батареи необходимо заложить 1,37 м расстояния между рядами или земельный участок, на котором будут раз-

мещаться солнечные батареи, должен быть больше их суммарной площади на 37 %. При этом с каждого квадратного метра в потери в год составят 339,4 кВт · ч.

На основании полученных данных можно выполнить расчет объема генерируемой электроэнергии с единицы площади. Суммарный объем электроэнергии, вырабатываемый с одной солнечной батареи, можно определить по следующему выражению:

$$W_e = \left(\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{e,i} \cdot I_{e,i}}{1000} N_i - Los \right) S_e, \quad (12)$$

где P_e – мощность элемента при стандартных условиях; N_i – количество дней в месяце; Los – значение годовых потерь в зависимости от GCR ; S_e – площадь элемента.

Для расчета возьмем солнечную батарею CHN100-36M со следующими характеристиками:

- $P_e = 100$ Вт;
- $S_e = 0,648$ м²;
- стоимость – 8000 руб.

Для выбранного элемента выработка электроэнергии составит 100,72 кВт · ч в год. При этом максимальная мощность, выдаваемая солнечной батареей, будет колебаться в пределах от 298 до 703 Вт.

Оценка экономической обоснованности применения СЭС для генерации электроэнергии на территории Пензенской области

В жизненном цикле СЭС существует два типа затрат: капитальные затраты и операционные затраты. Структура капитальных затрат приведена на рис. 9 [10].

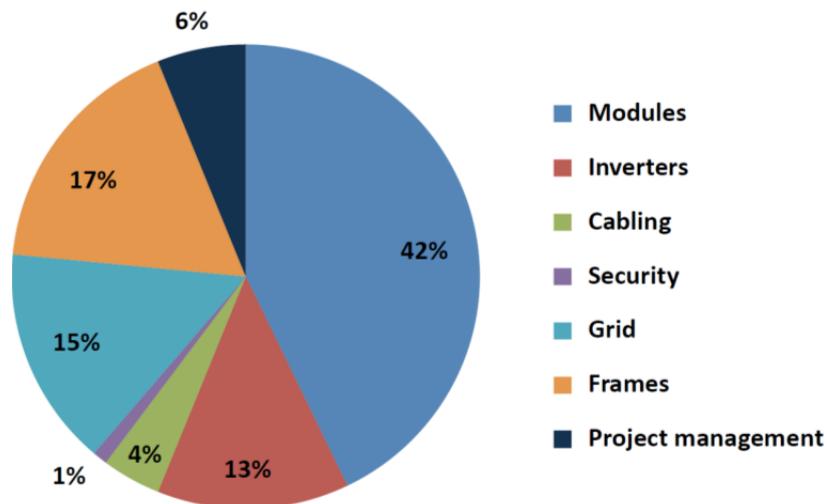


Рис. 9. Структура капитальных затрат СЭС

Операционные затраты составляют в среднем 2,200\$/год на МВт установленной мощности.

При расчете стоимости будем учитывать, что СЭС мощностью 1 МВт будет построена из 3 000 модулей CHN100-36M.

Тогда стоимость СЭС составит

$$C_{сэс} = 8 \cdot 3000 / 0,42 = 57,1 \text{ млн руб.}$$

Годовая выработка электроэнергии составит – 302,2 МВт · ч.

Таким образом, годовая выручка составит:

- при продаже электроэнергии на ОРЭМ составит (1 руб./кВт · ч) – 302,2 тыс. руб.;
- при продаже электроэнергии непосредственно потребителю (3,1 руб./кВт · ч) – 936,8 тыс. руб.

Срок окупаемости СЭС составит

$$T = 57,1 / (0,936 - 0,132) = 71 \text{ год.}$$

При этом срок жизненного цикла солнечных батарей СЭС составляет 25 лет. Для сравнения приведем срок окупаемости подобной СЭС в Германии.

Годовая выручка при продаже электроэнергии непосредственно потребителю (17,5 руб./кВт · ч) составит 5,29 млн руб.

Срок окупаемости СЭС составит

$$T = 57,1 / (5,29 - 0,132) = 11 \text{ лет.}$$

Таким образом, построение СЭС в средней полосе России на данный момент является экономически не обоснованным. Но при этом данные станции в сочетании с ВЭУ [11] могут быть использованы для электроснабжения удаленных районов.

1. Пензенский регион является перспективным с точки зрения внедрения технологии генерации электроэнергии на СЭС, обладая большим значением солнечной радиации, чем некоторые регионы Европы, в которых уже построены СЭС.

2. На территории Пензенской области наиболее перспективным является юго-запад региона, обладающий среднегодовым значением ИРС – 3,36 кВт · ч/м² в день.

3. При существующих значениях стоимости солнечных батарей, КПД солнечных батарей, тарифов на электроэнергию построение СЭС на территории Пензенской области является экономически не обоснованным.

Библиографический список

1. Путилов, В. А. Комплекс имитационных моделей поддержки управления региональной безопасностью / В. А. Путилов, А. В. Маслобоев, В. В. Быстров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 143–158.
2. Отчеты в рамках РККК. – URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php (дата обращения: 09.02.2016).
3. Key world energy statistics. International energy agency. – FR : Chirat, 2015. – 81 p.
4. Маслобоев, А. В. Средства поддержки интероперабельности сетевых систем управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 91–105.
5. Сайт системного оператора Единой энергетической системы. – URL: http://so-ups.ru/?id=rdu_penza (дата обращения: 09.02.2016).
6. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива. Показатели по территориям / под ред. П. П. Безруких. – Москва : ИАЦ Энергия, 2007. – 272 с.
7. Сайт национального аэрокосмического агентства. – URL: https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_INSOL_M
8. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. A Project Developer's Guide. – IFC, 2015. – 212 p.
9. Narvarte, L. Tracking and Ground Cover Ratio / L. Narvarte, E. Lorenzo // Progress in photovoltaics: research and applications. – 2008. – Vol. 16. – P. 703–714.
10. Renewable power generation costs in 2014. – IRENA, 2014. – 164 p.
11. Дзензерский, В. А. Принципы построения гибридных ветро-солнечных энергоустановок – ЗНТУ / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник и др. // Электротехника и электроэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 67–72

References

1. Putilov V. A., Masloboev A. V., Bystrov V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 143–158. [In Russian]
2. *Otchety v ramkakh RKIK* [Reports under the UNFCCC]. Available at: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php (accessed 09.02.2016). [In Russian]
3. *Key world energy statistics. International energy agency*. FR: Chirat, 2015, 81 p.
4. Masloboev A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2020, no. 1 (29), pp. 91–105. [In Russian]
5. *Sayt sistemnogo operatora Edinoy energeticheskoy sistemy* [Website of the Unified Energy System system operator]. Available at: http://so-ups.ru/?id=rdu_penza (accessed 09.02.2016). [In Russian]
6. *Spravochnik po resursam vozobnovlyaemykh istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva. Pokazateli po territoriyam* [Reference resources renewable energy sources of Russia and local types of fuel. Figures for the territories]. Ed. by P. P. Bezrukikh. Moscow: IATs Energiya, 2007, 272 p. [In Russian]
7. *Sayt natsional'nogo aerokosmicheskogo agentstva* [Website of the National Aerospace Agency]. Available at: https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_INSOL_M [In Russian]

8. *Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. A Project Developer's Guide*. IFC, 2015, 212 p.
9. Narvarte L., Lorenzo E. *Progress in photovoltaics: research and applications*. 2008, vol. 16, pp. 703–714.
10. *Renewable power generation costs in 2014*. IRENA, 2014, 164 p.
11. Dzenzerskiy V. A., Zhitnik N. E. et al. *Elektrotehnika i elektroenergetika* [Electrical engineering and electric power industry]. 2007, no. 1, pp. 67–72. [In Russian]

Елинов Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: edorm86a@gmail.com

Бирюкова Ольга Вячеславовна

старший преподаватель,
Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Пензенский филиал)
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail: fekla_06@list.ru

Чернецов Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
заведующий кафедрой технического
управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kafedratuk@yandex.ru

Лапшин Эдуард Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Тюрина Лилия Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nvershinin@yandex.ru

Elinov Dmitriy Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Biryukova Ol'ga Vyacheslavovna

senior lecturer,
Moscow State University of Technology
and Management named after K. G. Razumovsky
(Penza branch)
(6 Volodarsky street, Penza, Russia)

Chernetsov Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
head of sub-department of technical
quality management,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova avenue / Gagarin street,
Penza, Russia)

Lapshin Eduard Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Tyurina Lilia Alexandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technosphere safety,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Оценка возможности применения солнечных электростанций для генерации электроэнергии на территории Пензенской области / Д. А. Елинов, О. В. Бирюкова, М. В. Чернецов, Э. В. Лапшин, Л. А. Тюрина // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 139–148. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-15.

Е. В. Рыбак

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ СЕМЕЙСТВА AIRBUS A-320 ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ПОСТОРОННИМИ ПРЕДМЕТАМИ

E. V. Rybak

MAINTENANCE FEATURES AIRCRAFT OF THE AIRBUS A320 FAMILY IF DAMAGED BY FOREIGN OBJECTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность статьи связана с регулярными случаями попадания птиц в воздушные судна. Цель статьи – показать, сколько требуется человеческих, временных и экономических ресурсов, чтобы вновь ввести воздушное судно в эксплуатацию. *Материалы и методы.* Рассматривается процесс технического обслуживания авиационного двигателя после столкновения воздушного судна с птицей. Весь процесс описывается в три этапа, включая описание примера, и строго регламентируется производителем воздушных судов компанией AIRBUS. Вся технология, материалы и специальное оборудование указаны в основных документах «Руководство по техническому обслуживанию (Aircraft Maintenance Manual)» и «Руководство по ремонту конструкции воздушного судна (Structural Repair Manual)». *Результаты.* Также описываются технологии предотвращения попаданий птиц в ВС, используемые в аэропортах на территории РФ. Представлен анализ статистики за 2018 и 2019 гг. Производится оценка степени ущерба. *Вывод.* Устранение последствий повреждения ВС посторонними предметами является долгосрочным и экономически невыгодным процессом. Актуальность сотрудничества орнитологических служб и аэропортов стоит на первом месте и напрямую влияет на безопасность полетов.

Ключевые слова: техническое обслуживание, инженерно-технический персонал, статистика, анализ, воздушное судно, птица, авиакомпания.

Abstract. *Background.* The relevance of the article is associated with regular cases of birds getting into aircraft. The purpose of the article is to show how much human, time and economic resources are required to put the aircraft back into operation. *Materials and methods.* The process of maintenance of an aircraft engine after the collision of an aircraft with a bird is considered. The entire process is described in three steps, including a description of the example, and is strictly regulated by the aircraft manufacturer AIRBUS. All technology, materials and special equipment are listed in the main documents "Aircraft Maintenance Manual" and "Structural Repair Manual". *Results.* It also describes the technologies for preventing birds from entering the aircraft used at airports in the Russian Federation. The analysis of statistics for 2018 and 2019 is considered. The degree of damage is assessed. *Conclusion.* Elimination of the consequences of damage to the aircraft by foreign objects is a long-term and economically unprofitable process. The relevance of cooperation between ornithological services and airports is in the first place and directly affects flight safety.

Keywords: maintenance, engineering personnel, statistics, analysis, aircraft, bird, airline.

Статистика инцидентов и добровольных сообщений

Согласно данным официальной статистики Федерального агентства воздушного транспорта (рис. 1), за 2018 г. произошло 74 инцидента и 946 случаев добровольного сообщения о столкновении воздушных судов (ВС) с птицами. На рис. 2 показано, что за 2019 г. этот показатель составил 1306 случаев добровольного сообщения и 80 инцидентов. Для объективности данных статистика 2020 г. не была учтена, так как авиасообщение в период пандемии было сокращено [1, 2].

Приняв во внимание официальные данные Росавиации, видим, что количество инцидентов и добровольных сообщений растет.

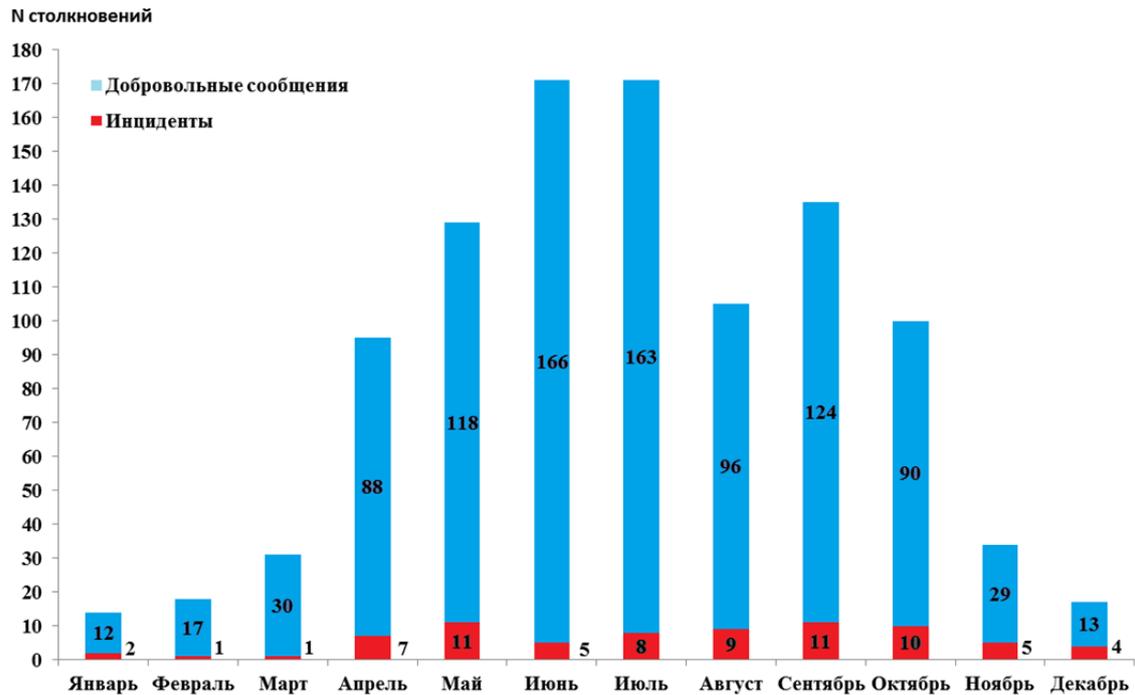


Рис. 1. Количество сообщений о случаях столкновения воздушных судов с птицами в 2018 г.

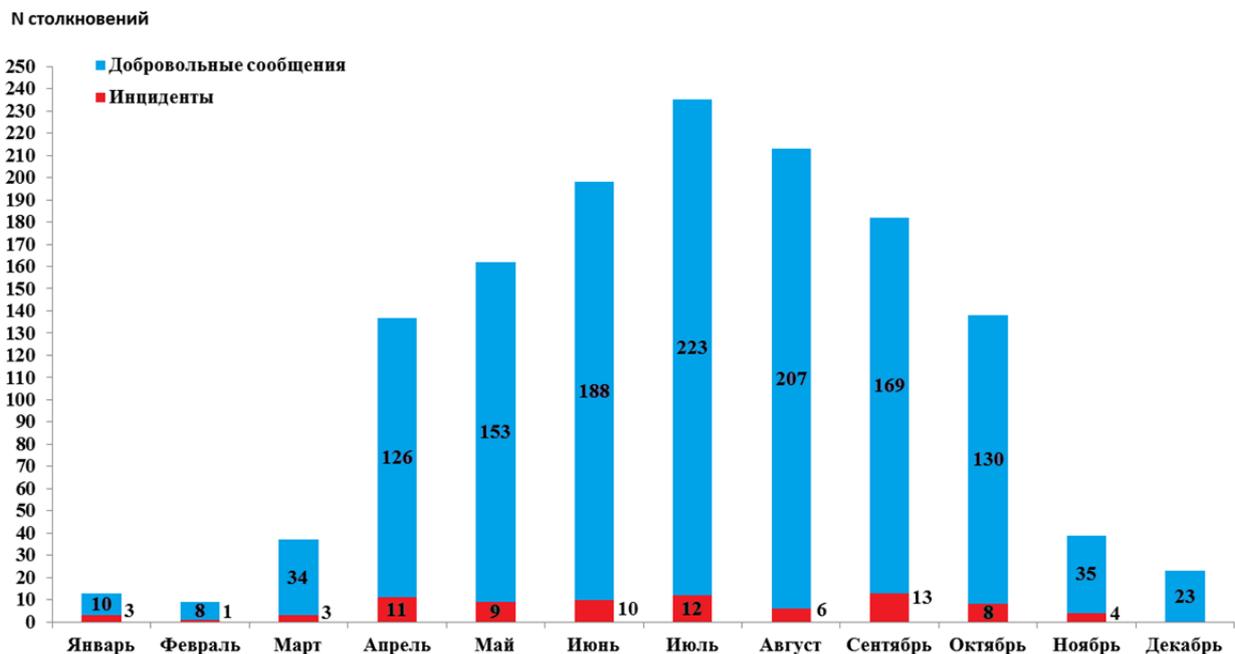


Рис. 2. Количество сообщений о случаях столкновения воздушных судов с птицами в 2019 г.

Следовательно, растет нагрузка на инженерно-технический персонал (ИТП). Каждый случай требует особой проверки состояния воздушных судов, масштаба и оценки повреждений, объема работ, требуемого для устранения последствий столкновения. Некоторые повреждения носят сильный характер, и в таких случаях требуется запрос на порядок действий у производителя ВС компании AIRBUS¹.

¹ Одна из крупнейших авиастроительных компаний в мире, образованная в конце 1960 – х годов путем слияния нескольких европейских авиапроизводителей. Производит пассажирские, грузовые и военно-транспортные самолеты под маркой AIRBUS.

Чаще всего авиакомпании обходятся собственными ресурсами. Инженерно-технический персонал делает тщательный осмотр после каждого рейса, следуя строгому порядку и перечню работ, предписанных авиакомпанией и производителем [3] (рис. 3).



Рис. 3. Анализ данных о столкновениях воздушных судов с птицами (се виды сообщений) в 2018 г.

Исходя из статистики, представленной выше, видим, что наиболее подверженной столкновению с птицами частью ВС является двигатель. Поэтому далее будет разбираться допустимый случай столкновения ВС с птицей [4].

Пример. Экипаж с воздуха информирует о том, что при заходе на взлетно-посадочную полосу на высоте до 200 м в двигатель № 1 попала птица. Командир с воздуха передает в центр управления полетами авиакомпании об инциденте, далее информируется ИТП, служба безопасности аэропорта и авиакомпании, а также орнитологическая служба аэропорта. ИТП обязан действовать строго согласно документации производителя, в данном случае это «Руководство по техническому обслуживанию» (АММ¹).

Компания AIRBUS регламентирует процедуру инспектирования ВС в три этапа:

- 1) провести тщательный первичный визуальный осмотр всех поверхностей воздушного судна, с использованием стремянок для недоступных мест;
- 2) необходимо очистить места непосредственного контакта с поверхностями ВС от остатков органической массы;
- 3) выполнить инспекцию обнаруженных зон столкновения.

На первом этапе мы обнаружили следы столкновения с птицей на входном направляющем аппарате двигателя № 1. Далее рекомендуется получить доклад от экипажа ВС о наличии постороннего запаха в системе кондиционирования, поведении двигателя после столкновения, реакции навигационной и радиосистем, конфигурацию шасси, контроля системы управления полетом (предкрылки, закрылки, элероны, спойлеры) и выяснить, в какой фазе полета произошел инцидент [5].

Также вся информация об отказах по фазам полета собирается системой CFDIS², отобразить которую можно на экране бортового компьютера в Post Flight Report³ (PFR). Провести проверку всех событий, сообщенных экипажем, и данных на PFR для наилучшей оценки масштаба повреждений.

На третьем этапе, исходя из этих критериев, принимается решение о дальнейших действиях, применяется процедура «Неразрушающего контроля» для осмотра ВС. С помощью спецоборудования и эндоскопа специалисты выполняют тщательную инспекцию труднодоступных мест на нали-

¹ Aircraft Maintenance Manual – основной документ и руководство по техническому обслуживанию летательных аппаратов и авиационных двигателей компании AIRBUS.

² CFDIS – Centralized Fault Display Interface System (Система сбора отказов в полете).

³ Post Flight Report – отчет об отказах, содержит неисправности 1 и 2 класса по фазам полета и информацию для поиска и устранения неисправностей.

чие скрытых повреждений, таких как трещины, царапины, вмятины, отсутствие компонентов, течь топлива, масла или гидрожидкости, а также остатков органической массы. При обнаружении повреждения двигателя ИТП обращается к «Руководству по ремонту конструкции ВС» (SRM¹). В данном документе описаны все утвержденные лимиты повреждений и процедуры по ремонту ВС, а также представлен перечень материалов и инструментов, требуемых для устранения повреждений. Если повреждения критичны, то ВС снимается с полетов до устранения неисправностей.

Если внутренние и внешние повреждения отсутствуют, то принимается решение о вводе ВС в дальнейшую эксплуатацию [6].

Технологии предотвращения попаданий птиц в ВС

В аэропортах РФ используются достаточно примитивные технологии:

– Зеркальный шар – это шар, покрытый маленькими кусочками зеркал, блики которых отпугивают птиц (рис. 4) [7].



Рис. 4. Зеркальный шар

– Лазерные пистолеты, предназначенные для отпугивания птиц в ночное время суток (рис. 5).



Рис. 5. Лазерные пистолеты

– Отстрел, выжигание травы и вырубка деревьев на территории аэропорта.
– «Чучело», установленные вдоль взлетно-посадочной полосы, имитируют присутствие людей (рис. 6) [8].

¹ SRM – Structural Repair Manual – Руководство по ремонту конструкции ВС.



Рис. 6. «Чучело»

– Макеты хищных птиц (рис. 7) [9].

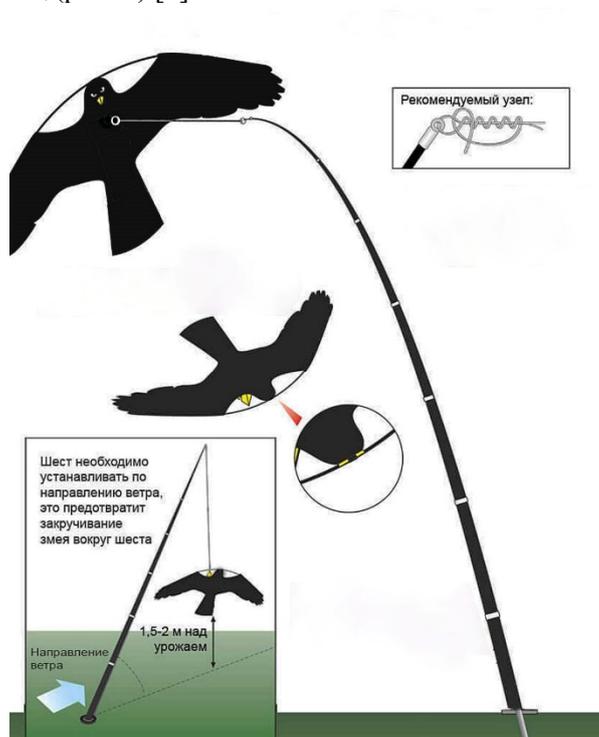


Рис. 7. Макет хищной птицы

Этим описанием хочу показать сколько человеческих, временных и экономических ресурсов в случае снятия ВС с эксплуатации задействуется для того, чтобы устранить последствия столкновения с птицами. Исходя из вышепредставленной статистики, можно понять, что тех мер, которые принимают орнитологические службы аэропортов РФ, недостаточно, так как ежегодно количество случаев растет. Технологии, которые используются сегодня, становятся не актуальными, а это напрямую влияет на безопасность полетов в целом.

Библиографический список

1. URL: <https://favt.ru/deyatelnost-bezopasnost-poletov-stolknoveniya-ptici-stat/> (дата обращения: 08.12.2020).
2. URL: <https://otpugivately.ru/equipment/visual-equipment/185-otpugivatel-zerkalnyj-shar> (дата обращения: 08.12.2020).

3. URL: <https://otpugivатели.ru/equipment/laser-equipment/93-lazernyj-otpugivatel-ptits-dissuader> (дата обращения: 08.12.2020).
4. URL: <https://63.ru/text/world/2019/08/15/66199315/> (дата обращения : 08.12.2020).
5. URL: https://um-teh.ru/catalog/dom_i_sad/otpugivатели/otpugivатели_ptits/dinamicheskij-otpugivatel-ptits-kruk/ (дата обращения: 08.12.2020).
6. Грабовский, В. И. Орнитологическая защита предприятия / В. И. Грабовский, А. Л. Мосешвили // Пищевая промышленность. – 2010. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ornitologicheskaya-zaschita-predpriyatiya> (дата обращения: 08.12.2020).
7. Мацюра, А. В. Обзор акустических средств для отпугивания птиц / А. В. Мацюра, Р. В. Яковлев, П. Н. Уланов // *Acta Biologica Sibirica*. – 2016. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-akusticheskikh-sredstv-dlya-otpugivaniya-ptits> (дата обращения: 08.12.2020).
8. Ильичев, В. Д. Экология и управление поведением птиц / В. Д. Ильичев. – Москва : Знание, 1988. – 63 с.
9. Звонов, Б. М. Методические рекомендации по применению акустического отпугивания птиц в рыбководческих хозяйствах Астраханской области / Б. М. Звонов, Г. А. Кривоносов. – Астрахань, 1979. – С. 24–30.

References

1. Available at: <https://favt.ru/deyatelnost-bezopasnost-poletov-stolknoveniya-ptici-stat/> (accessed 08.12.2020).
2. Available at: <https://otpugivатели.ru/equipment/visual-equipment/185-otpugivatel-zerkalnyj-shar> (accessed 08.12.2020). [In Russian]
3. Available at: <https://otpugivатели.ru/equipment/laser-equipment/93-lazernyj-otpugivatel-ptits-dissuader> (accessed 08.12.2020). [In Russian]
4. Available at: <https://63.ru/text/world/2019/08/15/66199315/> (accessed 08.12.2020).
5. Available at: https://um-teh.ru/catalog/dom_i_sad/otpugivатели/otpugivатели_ptits/dinamicheskij-otpugivatel-ptits-kruk/ (accessed 08.12.2020). [In Russian]
6. Grabovskiy V. I., Moseshvili A. L. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food processing industry]. 2010, no. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ornitologicheskaya-zaschita-predpriyatiya> (accessed 08.12.2020). [In Russian]
7. Matsyura A. V., Yakovlev R. V., Ulanov P. N. *Acta Biologica Sibirica*. 2016, no. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-akusticheskikh-sredstv-dlya-otpugivaniya-ptits> (accessed 08.12.2020).
8. Il'ichev V. D. *Ekologiya i upravlenie povedeniem ptits* [Ecology and management of bird behavior]. Moscow: Znanie, 1988, 63 p. [In Russian]
9. Zvonov B. M., Krivonosov G. A. *Metodicheskie rekomendatsii po primeniyu akusticheskogo otpugivaniya ptits v rybovodcheskikh khozyaystvakh Astrakhanskoy oblasti* [Methodological recommendations for the use of acoustic bird repelling in fish farms of the Astrakhan region]. Astrakhan, 1979, pp. 24–30. [In Russian]

Рыбак Евгений Васильевич

авиатехник,

АО «Авиакомпания Россия»

(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 18/4)

E-mail: Evgeniirybak1989@gmail.com**Rybak Evgenii Vasilevich**

aircraft technician,

JSC «Rossiya-Airlines»

(18/4 Pilotov street, Saint Petersburg, Russia)

Образец цитирования:

Рыбак, Е. В. Особенности технического обслуживания воздушных судов семейства AIRBUS A-320 при повреждении посторонними предметами / Е. В. Рыбак // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 149–154. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-16.

Е. В. Рыбак

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ AIRBUS A-320 FAMILY
ПОСЛЕ СЛОЖНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ**

E. V. Rybak

**MAINTENANCE OF THE AIRBUS A-320 FAMILY
AFTER DIFFICULT OPERATING CONDITIONS**

Аннотация. Актуальность и цели. Актуальность работы связана с возможными перерывами в эксплуатации авиационной техники по погодным условиям. Из-за стихии могут отменяться сразу все авиарейсы. Вынужденный простой авиационной техники отрицательно сказывается на работе аэропортов. Цель статьи – показать, сколько требуется человеческих, временных и экономических ресурсов, чтобы вновь ввести воздушное судно в эксплуатацию. *Материалы и методы.* Методика и процесс технического обслуживания строго регламентируются производителем воздушных судов компанией AIRBUS. Вся технология, материалы и специальное оборудование указаны в основных документах «Руководство по техническому обслуживанию (Aircraft Maintenance Manual)» и «Руководство по ремонту конструкции воздушного судна (Structural Repair Manual)». *Результаты.* Рассматриваются процесс и порядок технического обслуживания воздушного судна в условиях песчано-пылевой бури. Описан поэтапный осмотр всех элементов и систем самолета, а также произведены оценка ущерба и необходимые замены компонентов. *Вывод.* Устранение последствий песчано-пылевой бури является долгосрочным и экономически невыгодным процессом. При этом особо важное значение приобретает прогнозирование таких погодных катаклизмов, как песчано-пылевые бури.

Ключевые слова: инспекция, загрязнение, инженерно-технический персонал, авиакомпания, песчано-пылевая буря, эксплуатация.

Abstract. *Background.* The relevance of the work is associated with possible interruptions in the operation of aviation equipment due to weather conditions. Because of the elements, all flights can be canceled at once. Forced downtime of aviation technology adversely affects the operation of airports. The purpose of the article is to show how much human, time and economic resources are required to re-enter the aircraft into operation. *Materials and methods.* The procedure and maintenance process is strictly regulated by the aircraft manufacturer AIRBUS. All technology, materials, and special equipment are listed in the main documents «Aircraft Maintenance Manual» and «Aircraft structural Repair Manual». *Results.* The article discusses the process and procedure for aircraft maintenance in a sand and dust storm. A step-by-step inspection of all elements and systems of the aircraft, as well as damage assessment and necessary component replacements are described. *Conclusion.* Eliminating the effects of sand and dust storm pollution is a long-term and economically unprofitable process. At the same time, the prediction of such weather disasters as sand and dust storms is of particular importance.

Keywords: inspection, pollution, engineering personnel, airline, dust and sand storm, operation.

Данная работа посвящена проверке воздушного судна (ВС) после полета в условиях песчано-пылевой бури¹ или после загрязнения ВС песчано-пылевой смесью, когда ВС находилось на земле. Подобные инспекции связаны с уровнем сохранности самолета, необходимы для компонентов и систем, для которых не было предусмотрено никакой консервации (песок и пыль могут быть обнаружены за лючками, защитными крышками, заглушками). Частицы песка/пыли имеют различные размеры, могут наносить повреждения лакокрасочного покрытия (ЛКП), обшивки, проникать во все отверстия и вызывать эрозию, а также оставаться на всех открытых смазанных поверхностях и вызывать загрязнение всех фильтрующих элементов.

¹ Песчано-пылевая буря – это необычное явление, при котором сильные ветры выбрасывают в воздух большое количество песка/пыли. Идет на больших площадях, сильно снижая видимость.

Порядок действий при инспекции:

1. Все необходимые проверки являются визуальными. Авиакомпании могут обратиться к осмотру с использованием процедур «неразрушающего контроля» с помощью эндоскопа и спецоборудования.

2. При обнаружении повреждения конструкции самолета авиакомпания обращается к «Руководству по ремонту конструкции ВС» (SRM). В данном документе описаны все утвержденные лимиты повреждений и описаны процедуры по ремонту ВС, а также представлен перечень материалов и инструментов, требуемых для устранения повреждений [1].

3. Если обнаружены следы повреждения ЛКП, следует также обратиться к «Руководству по ремонту конструкции ВС» (SRM). В нем прописаны процедуры ремонта/защиты ЛКП.

4. Необходимо исследовать поверхности ВС, системы, конструкции ВС на предмет загрязнения, эрозии/истирания, вмятин, расслоения или других повреждений.

Если загрязнение ВС песчано-пылевой смесью происходило в полете или во время взлета/посадки, необходимо у экипажа получить информацию об условиях полета. Также вся информация об отказах по фазам полета собирается системой CFDIU¹, отобразить которую можно на экране бортового компьютера в Post Flight Report (PFR)² (рис. 1). Необходимо провести проверку всех событий, сообщенных экипажем и данными на PFR [2].



Рис. 1. Пьедестал ввода и управления данными

Если загрязнение произошло, когда самолет находился на земле с установленными заглушками, чехлами/устройствами, проводить проверку систем не требуется, если не обнаружено за ними следов песка/пыли.

¹ CFDIS – CENTRALIZED FAULT DISPLAY INTERFACE SYSTEM (Система сбора отказов в полете).

² Post Flight Report – отчет об отказах, содержит неисправности 1 и 2 класса по фазам полета и информацию для поиска и устранения неисправностей.

Запрещено протирать поверхность при удалении песка/пыли, так как это может вызвать истирание или эрозию, а также использовать жидкость, которая при смешивании с песком/пылью образует пасту, которая также может стать причиной эрозии и истирания [3].

Если на поверхности самолета есть слой сухого песка/пыли, требуется удалить его пылесосом или воздушным компрессором. При отсутствии оборудования следует использовать щетку с мягкой щетиной или хлопковую ткань без ворса. При обнаружении влажного песка/пыли – использовать оборудование с низким давлением для подачи воды для удаления влажных загрязнений, запрещено направлять струю в направлении датчиков. Также запрещено использовать распылительное оборудование с высоким давлением.

Перед процедурой удаления обклеить полиэтиленовой пленкой приемники статического давления, как это показано на рис. 2.



Рис. 2. Приемник статического давления с нанесенной защитной пленкой

Приемники динамического давления и датчики «Угла атаки», датчики обледенения, датчики температуры наружного воздуха показаны на рис. 3.



Рис. 3. Приемник динамического давления и датчик угла «Атаки»

Порядок осмотра ВС:

– Внутренняя инспекция. Производится осмотр кабины, пассажирского салона, туалетов и датчиков дыма, при необходимости датчики меняются. Осмотр и очистка кислородных масок в кабине пилотов (рис. 4) [4].



Рис. 4. Кислородная маска в кабине ВС

Также необходима инспекция переднего технического отсека, удаление загрязнения с поверхностей оборудования, блоков и зоны системы вентиляции. Далее производится осмотр и очистка грузовых отсеков, в случае выхода из строя датчиков детектора дыма следует их заменить.

– Инспекция фюзеляжа, крыла и стабилизатора. Производится осмотр ветрового стекла, пассажирских иллюминаторов, пассажирских дверей и аварийных выходов салона ВС. Инспектируются обшивка фюзеляжа, крыло, предкрылки, закрылки, элероны, спойлеры, разрядники статического давления, рельсы и механизмы выпуска/уборки механизации, сервоприводы, сервоконтроллеры механизации системы управления полетом (рис. 5), трубопроводы гидросистемы на наличие повреждений и загрязнений [5].

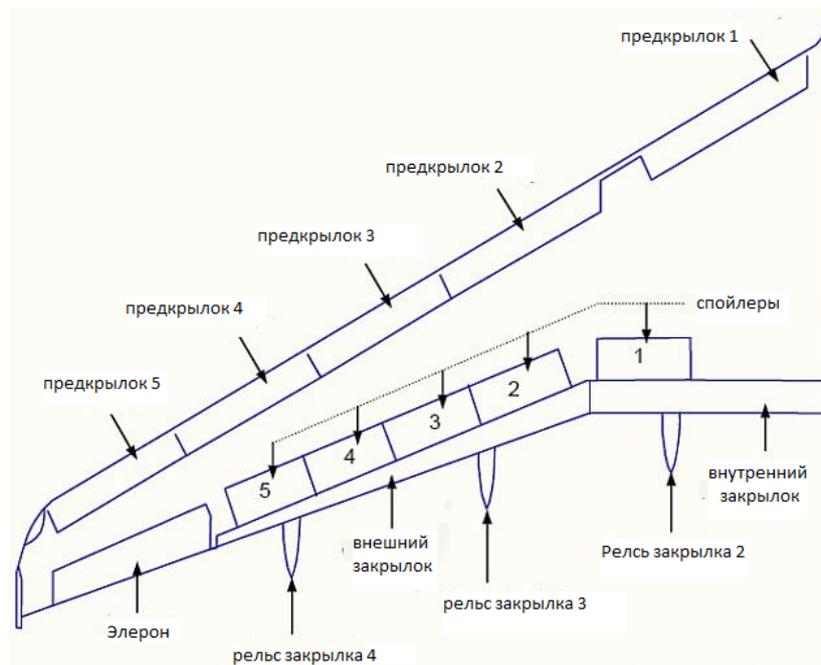


Рис. 5. Механизация крыла

– Инспекция приемников статического и динамического давления. Осмотреть все приемники на наличие повреждений, загрязнений (засоров). При необходимости очистить.

– Инспекция основных и носовой опор шасси. Если в полете створки основных и носовой опор шасси были закрыты во время песчано-пылевой бури, то в инспекции нет необходимости. Если ВС находилось на земле с выпущенными опорами, то следует осмотреть все поверхности шасси, удалить загрязнения с хромированной области амортизаторов и актюаторов. Выполнить полную процедуру смазки (рис. 6) [6].

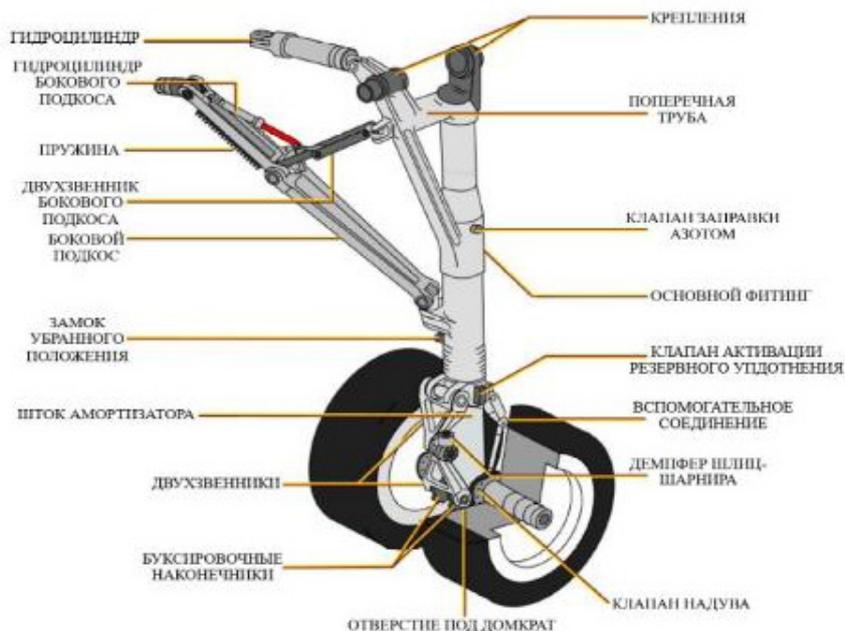


Рис. 6. Основная опора шасси и расположение компонентов

– Инспекция пилонов и силовых установок (рис. 7). Осмотреть входной направляющий аппарат и реверс двигателей на наличие повреждений и загрязнений. Открыть капоты двигателей и выполнить осмотр всех фильтрующих элементов и индикаторов засорения. Получить образцы масла и осмотреть на наличие посторонних примесей. Если самолет находился на земле и на двигателях были установлены заглушки, в инспекции нет необходимости, если не обнаружено за ними следов песка/пыли.

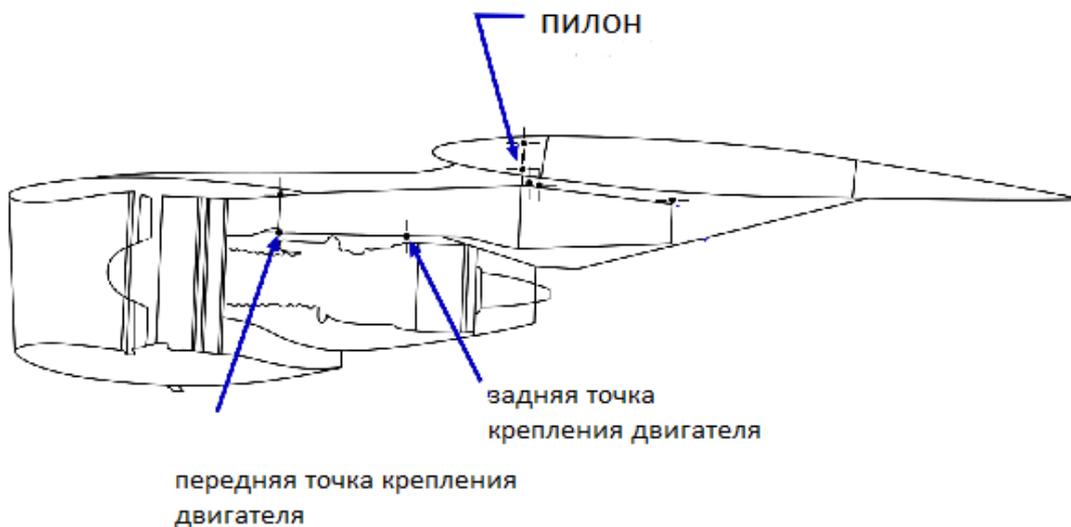


Рис. 7. Пилон, двигатель и точки крепления двигателя к пилону

– Инспекция гидравлической и топливной систем. Выполнить осмотр фильтрующих элементов и индикаторов засорения, при необходимости заменить. Получить образец жидкости и убедиться в отсутствии загрязнения.

Выполнив инспекцию, авиакомпания принимает решение о дальнейшей эксплуатации воздушного судна. Подобная процедура осмотра является достаточно объемной и вовлекает в процесс большие человеческие и финансовые ресурсы. В регионах юга России в 2020 г. это явление встречается довольно часто. Поэтому сотрудничество аэропортов и метеорологических центров является приоритетным вопросом, чтобы сократить ресурсные издержки.

Библиографический список

1. Aircraft Maintenance Manual, компания AIRBUS, ревизия 33 от 01.08.2020. – 17 с.
2. ДТО АТ ЗП. Наземное обслуживание самолета Airbus A320. – Новосибирск, 2003. – 41 с.
3. Корнеев, В. М. Самолет А320. Анализ конструкции и летной эксплуатации / В. М. Корнеев. – Екатеринбург : Ridero, 2016. – 74 с.
4. Нургалеев, А. Особенности обслуживания самолетов Airbus A320 / А. Нургалеев // Сайт АвиаПорт.Ru. – 2012. – URL: <https://www.aviaport.ru/news/2012/06/29/236783.html> (дата обращения: 08.12.2020).
5. URL: <https://aviarf.ru/aerobus-320-komfort-nadyozhnost/> (дата обращения: 08.12.2020).
6. Ицкович, А. А. Анализ состояния и тенденций развития Центров технического обслуживания и ремонта воздушных судов / А. А. Ицкович, Ю. М. Чинючин, Н. Н. Смирнов, И. А. Файнбург // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 178. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-i-tendentsiy-razvitiya-tsentrov-tehnicheskogo-obslyuzhivaniya-i-remonta-vozdushnyh-sudov> (дата обращения: 08.12.2020).

References

1. *Aircraft Maintenance Manual, AIRBUS, revision 33 dated 01.08.2020.* 17 s.
2. *DTO AT ZP. Nazemnoe obsluzhivanie samoleta Airbus A320* [DТО АТ РО. Ground handling of Airbus A320 aircraft]. Novosibirsk, 2003, 41 p. [In Russian]
3. Korneev V. M. *Samolet A320. Analiz konstruktssii i letnoy ekspluatatsii* [The A320 plane. Design and flight operation analysis]. Ekaterinburg: Ridero, 2016, 74 p. [In Russian]
4. Nurgaleev A. *Osobennosti obsluzhivaniya samoletov Airbus A320* [Features of Airbus A320 aircraft maintenance]. AviaPort.Ru. website. 2012. Available at: <https://www.aviaport.ru/news/2012/06/29/236783.html> (accessed 08.12.2020). [In Russian]
5. Available at: <https://aviarf.ru/aerobus-320-komfort-nadyozhnost/> (accessed 08.12.2020). [In Russian]
6. Itskovich A. A., Chinyuchin Yu. M., Smirnov N. N., Faynburg I. A. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTU GA]. 2012, no. 178. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-i-tendentsiy-razvitiya-tsentrov-tehnicheskogo-obslyuzhivaniya-i-remonta-vozdushnyh-sudov> (accessed 08.12.2020). [In Russian]

Рыбак Евгений Васильевич

авиатехник,
АО «Авиакомпания Россия»
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 18/4)
E-mail: Evgeniirybak1989@gmail.com

Rybak Evgenii Vasilevich

aircraft technician,
JSC «Rossiya-Airlines»
(18/4 Pilotov street, Saint Petersburg, Russia)

Образец цитирования:

Рыбак, Е. В. Техническое обслуживание Airbus A-320 Family после сложных эксплуатационных условий / Е. В. Рыбак // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 155–160. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-17.