

# СОДЕРЖАНИЕ

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

**Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю.**

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
АППРОКСИМАЦИИ МНОЖЕСТВА ОПТИМАЛЬНЫХ  
ТРАЕКТОРИЙ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА ..... 3

**Сафронов В. В.**

ПОСТРОЕНИЕ ИСТИННЫХ КОРТЕЖЕЙ ПАРЕТО  
В ЗАДАЧАХ ГИПЕРВЕКТОРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ СИСТЕМ..... 11

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

**Гриднев В. Н., Миронова Ж. А., Шахнов В. А.**

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА КОМПОНОВКИ МОНТАЖНЫХ КОНТАКТНЫХ  
ПЛОЩАДОК ВЫСОКОПЛОТНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ПЛАТЫ ..... 19

**Голованов О. А., Макеева Г. С., Вареница В. В.**

ПРОВОДИМОСТЬ ГРАФЕНА В ТЕРАГЕРЦОВОМ  
И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ ..... 26

## НАДЕЖНОСТЬ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Куатов Б. Ж.**

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ТРЕНАЖЕНОЙ  
ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ ..... 34

**Годунов А. И., Лобачев А. В.**

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ  
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ..... 41

**Садыков С. С., Терехин А. В.**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
НА ТЕСТОВЫХ ПРОЕКЦИЯХ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ..... 48

## МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

**Дедков В. К., Юрков Н. К.**

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЕМ..... 53

**Волков С. В., Кулапин В. И., Светлов А. В.**  
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ  
В ОБЕСПЕЧЕНИИ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ..... 61

**Садыхов Г. С., Савченко В. П., Бабаев И. А.**  
РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОПАСНЫХ  
И БЕЗОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ ТЕХНОГЕННО-ОПАСНОГО ОБЪЕКТА..... 69

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

**Штыков Р. А.**  
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ГАЗА ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ НИТЕЙ,  
ГРУППИРОВАННЫХ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ  
В ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ..... 78

**Голушко Д. А.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ  
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ..... 83

**Голушко Д. А., Затылкин А. В., Юрков Н. К.**  
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ ФАЗ  
ВНЕШНЕГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ..... 88

**Домкин К. И.**  
ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВП НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ  
МАКРОМОДЕЛИ ПОЛИМЕРНО-УГЛЕРОДНЫХ СИСТЕМ ..... 93

**Жумабаева А. С., Затылкин А. В., Кочегаров И. И.**  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РЭС..... 98

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 62-50, 519-714

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ МНОЖЕСТВА ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА<sup>1</sup>

А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько

### *Введение*

В работе рассматривается задача синтеза системы управления. Задача заключается в нахождении управления в виде многомерной функции, описывающей функциональную зависимость вектора управления от вектора состояния объекта. Последние достижения в области алгоритмизации, в частности метод сетевого оператора [1–6], позволяют создавать вычислительные методы для решения задачи синтеза управления.

В настоящей работе рассматривается вычислительный метод синтеза системы управления, состоящий из двух этапов. На первом этапе решаем задачи оптимального управления для каждого начального состояния из заданного дискретного множества начальных условий. Для решения задачи оптимального управления используем вычислительный метод, построенный на основе вариационного генетического алгоритма. После решения каждой задачи оптимального управления получаем оптимальные значения управления и оптимальные траектории движения объекта. На втором этапе решаем методом сетевого оператора задачу аппроксимации множества точек оптимальных траекторий.

В качестве прикладного примера в работе рассматривается задача управления спуском космического аппарата на поверхность Луны [6].

### *Формальная постановка задачи*

Рассмотрим формальную постановку задачи синтеза системы управления.

Задана математическая модель объекта управления

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния объекта управления;  $\mathbf{u}$  – вектор управления,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]^T$ ,  $\mathbf{u} = [u_1 \dots u_m]^T$ ,  $U$  – ограниченное замкнутое множество.

Для системы (1) задано множество начальных значений

$$\mathbf{x}(0) \in X_0 \subseteq \mathbb{R}^n, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00008а.

Заданы терминальные условия

$$\Phi_i(\mathbf{x}(t_f)) = 0, \quad i = \overline{1, l}, \quad (3)$$

где  $t_f$  – время окончания процесса управления.

Задан критерий качества управления

$$J = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

Необходимо найти управление в виде

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{x}), \quad (5)$$

где  $\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{x})$  – многомерная функция, удовлетворяющая условиям

$$\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}(\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^0, t)) \in U, \quad (7)$$

$$\int_0^{t_f} f_0(\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^0, t), \tilde{\mathbf{h}}(\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^0, t))) dt = \min_{\mathbf{u} \in U} \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt, \quad (8)$$

где  $\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^0, t)$  – решение системы:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{x})), \quad (9)$$

при начальных условиях  $\forall \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 \in X_0$ .

Для решения задачи синтеза (1)–(8) можно использовать численный метод сетевого оператора, подробно описанный в работах [1–6]. Метод обеспечивает поиск решения в форме (5) по критерию оптимизации (4) и терминальным условиям (3).

Если искать решение для одного конкретного начального значения

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 \quad (10)$$

в виде функции времени

$$\tilde{\mathbf{u}}(\cdot) = \left( \tilde{\mathbf{u}}(t) : t \in [0, t_f] \right), \quad (11)$$

то получим задачу оптимального управления (1), (3), (4), (10), (11).

После решения задачи оптимального управления для начального значения  $\mathbf{x}^0 \in X_0$  решение  $\tilde{\mathbf{x}}(t)$  системы уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{u}}(t)) \quad (12)$$

должно совпадать с решением  $\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^0, t)$  системы уравнений (9)

$$\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^0, t) = \tilde{\mathbf{x}}(t). \quad (13)$$

Неудовлетворение условия (13) говорит о том, что найденная в результате решения задачи синтеза функция  $\tilde{\mathbf{h}}(\mathbf{x})$  не позволяет получать оптимальные траектории движения объекта управления, т.е. не удовлетворяет условию (8).

Для получения решения, учитывающего условие (13) близости к оптимальному решению, задачу синтеза управления решаем в два этапа. На первом этапе решаем задачи оптимального управления для множества начальных значений из заданной области (2). Сохраняем множество точек оптимальных траекторий и оптимальных значений управления. На втором этапе решаем задачу аппроксимации множества полученных точек многомерной функцией методом сетевого оператора.

Опишем формальные соотношения двухэтапного синтеза системы управления.

Заменим множество начальных условий конечным множеством точек

$$\bar{X}_0 = \{x^{0,i} \in X_0 : i = \overline{1, M}\}. \quad (14)$$

Решаем  $M$  задач оптимального управления для каждого начального значения из (14) и сохраняем множество точек оптимальных траекторий

$$T_i = \{(t_0, \tilde{x}^i(t_0), \tilde{u}^i(t_0)), (t_1, \tilde{x}^i(t_1), \tilde{u}^i(t_1)), \dots, (t_K, \tilde{x}^i(t_K), \tilde{u}^i(t_K))\}, \quad (15)$$

где  $i = \overline{1, M}$ ,  $t_j = j\Delta t$ ,  $j = \overline{0, K}$ ,  $\Delta t$  – шаг дискретизации.

На первом этапе решения задачи оптимального управления используем вариационный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации [8].

На втором этапе решаем задачу аппроксимации точек (15) многомерной функцией. Для решения задачи используем метод сетевого оператора и критерий качества аппроксимации

$$J = \sum_{i=1}^M \sqrt{\sum_{j=0}^K (\tilde{u}^i(t_j) - h(\tilde{x}^i(t_j)))^2} \rightarrow \min. \quad (17)$$

В качестве примера используем рассмотренный метод для решения задачи синтеза системы управления спуском космического аппарата (КА) на поверхность Луны [7].

Модель объекта управления описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dV}{dt} = W \cos(u_1 - \theta) - g \cos \theta, \quad (18)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{V} (W \sin(u_1 - \theta) + g \sin \theta), \quad (19)$$

$$\frac{dh}{dt} = V \cos \theta, \quad (20)$$

$$\frac{dL}{dt} = V \sin \theta, \quad (21)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{P_0 + u_2}{P_{ud}}, \quad (22)$$

$$W = \frac{\tilde{g}P}{m}, \quad g = g_0 \left( \frac{R_0}{R_0 + h} \right)^2, \quad R = R_0 + h,$$

где  $V$  – модуль скорости движения космического аппарата;  $W$  – ускорение, создаваемое тягой двигателя торможения;  $\theta$  – угол наклона траектории относительно гравитационной вертикали;  $h$  – высота полета КА;  $R$  – модуль радиус-вектора от центра Луны до космического аппарата;  $R_0$  – средний радиус поверхности Луны;  $L$  – дальность вдоль поверхности;  $m$  – масса КА;  $P$  – тяга коррекционно-тормозного двигателя (Н);  $P_{ud}$  – удельный импульс коррекционно-

тормозного двигателя (м/с);  $g_0$  – гравитационное ускорение свободного падения на поверхности Луны,  $R_0 = 1738,4$  км,  $P_0 = 440$  кг,  $P_{ud} = 319$  с,  $g_0 = 1,623$  м/с<sup>2</sup>,  $\tilde{g} = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>.

Заданы области начальных значений:

$$V(0) = V_0, \theta(0) = \theta_0, h(0) \in [h_0^-, h_0^+], \phi(0) = \phi_0, m(0) = m_0, \quad (23)$$

где  $\theta_0^-, \theta_0^+$  – наименьшее и наибольшее начальные значения угла наклона траектории,  $h_0^-, h_0^+$  – наименьшее и наибольшее значения начальной высоты.

Заданы терминальные условия:

$$V(t_f) \in [V_f^-, V_f^+], h(t_f) \in [h_f^-, h_f^+], \quad (24)$$

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } (V(t) \in [V_f^-, V_f^+]) \wedge (h(t) \in [h_f^-, h_f^+]) \\ t^+ & \text{– иначе} \end{cases}, \quad (25)$$

где  $V_f^-, V_f^+$  – наименьшее и наибольшее терминальные значения модуля скорости,  $h_f^-, h_f^+$  – наименьшее и наибольшее терминальные значения высоты,  $t^+$  – максимальное время полета.

Значения компонент управления ограничены

$$u_1 \in [u_1^-, u_1^+], u_2 \in [u_2^-, u_2^+], \quad (26)$$

где  $u_i^-, u_i^+$  – наименьшее и наибольшее значения компоненты управления  $u_i$ ,  $i = 1, 2$ .

Заданы терминальные условия

$$\left( V(t_f) - \frac{V_f^- + V_f^+}{2} \right)^2 = 0, \quad (27)$$

$$\left( h(t_f) - \frac{h_f^- + h_f^+}{2} \right)^2 = 0. \quad (28)$$

Заданы критерии качества управления

$$J_1 = \alpha |L_f - L(t_f)| + |h_f^- + h_f^+ - 2h(t_f)| \rightarrow \min, \quad (29)$$

$$J_2 = |V_f - V(t_f)| \rightarrow \min, \quad (30)$$

где  $\alpha$  – весовой коэффициент;  $L_f$  – заданное терминальное значение дальности.

При решении задачи непрерывные интервалы начальных значений были заменены множествами точек

$$[h_0^-, h_0^+]^T \rightarrow \{h_{0,0}, h_{0,1}, \dots, h_{0,k_n}\}, \quad (31)$$

где

$$h_{0,j} = h_0^- + j\Delta h_0, \quad (32)$$

где  $\Delta h_0$  – величины приращений по углу наклона траектории и высоте.

В вычислительном эксперименте были использованы следующие параметры модели:  $V(0) = 1689$  м/с,  $\theta_0 = 1,6$  рад,  $h_0^- = 16,648$  км,  $h_0^+ = 19,648$  км,  $\phi(0) = 0$  рад,  $m(0) = 940$  кг,

$u_1^- = 0$  рад,  $u_1^+ = 3,14159265$  рад,  $u_2^- = -80$  кг,  $u_2^+ = +80$  кг,  $V_f^- = 0$  м/с,  $V_f^+ = +5$  м/с,  $h_f^- = 1,2$  км,  $h_f^+ = 1,8$  км,  $L_f = -240$  км,  $\Delta\theta_0 = 0,05$  рад,  $\Delta h_0 = 1,5$  км,  $k_h = 2$ ,  $\alpha = 0,1$ .

На первом этапе была решена задача оптимального управления для различных начальных значений, определенных соотношениями (30)–(33). Решение задачи осуществляли численно методом вариационного генетического алгоритма [8]. Для каждого оптимального решения были сохранены множества точек оптимального управления и оптимальных траекторий (15).

Затем на втором этапе по критерию (17) была решена задача синтеза системы управления методом сетевого оператора [1–6].

Для синтеза методом сетевого оператора было выбрано следующее базисное решение

$$u_i = \begin{cases} u_i^-, & \text{если } u_i \leq u_i^- \\ u_i^+, & \text{если } u_i \geq u_i^+, \quad i = 1, 2, \\ \tilde{u}_i & \text{иначе} \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 &= q_1^0 (\pi + \theta) + \frac{q_2^0}{h} (h_f - h) \vartheta(h_f - h), \\ \tilde{u}_2 &= -q_3^0 \theta \cos \theta, \quad \bar{h} = \frac{h_0^- + h_0^+}{2}, \quad \vartheta(A) = \begin{cases} 1, & \text{если } A \geq 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \\ \pi &= 3,14159265, \quad q_1^0 = 1, \quad q_2^0 = 1, \quad q_3^0 = 1. \end{aligned}$$

В результате синтеза было получено следующее управление:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 &= \sqrt[3]{A} + \operatorname{sgn}(B) \ln(|B| + 1) + \frac{1}{C} + \frac{1 - e^{-q_3 \theta}}{1 + e^{-q_3 \theta}} + \vartheta(D), \\ \tilde{u}_2 &= u_1 - u_1^3 + e^B - q_3 \theta \cos(\theta) + \vartheta(q_3 \theta) - q_2, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A &= \operatorname{sgn}(z_{11}) \left( e^{|z_{11}|} - 1 \right) + z_{10} + \frac{(h_f - h)}{\bar{h}}; \\ B &= \frac{e^{-q_3 \theta \cos(\theta)}}{q_2} \mu(z_9) \operatorname{sgn}(E) \left( e^{|E|} - 1 \right); \\ C &= E q_2^2 \left( \operatorname{sgn}(E) \sqrt{|E|} + q_2 + \frac{(h_f - h)}{\bar{h}} + (\theta + \pi) - (\theta + \pi)^3 \right); \\ D &= \operatorname{sgn}(E) \sqrt{|E|} + q_2 + \frac{(h_f - h)}{\bar{h}} + (\theta + \pi) - (\theta + \pi)^3; \\ E &= \frac{1 - e^{-q_2}}{1 + e^{-q_2}} q_1 (\theta + \pi), \quad q_1 = 4,008, \quad q_2 = 6,927, \quad q_3 = 12,07. \end{aligned}$$

На рис. 1–3 приведены результаты моделирования полученной системы управления. На рисунках представлены графики изменения основных переменных модели, используемых в критериях качества при решении задачи оптимального управления,  $V$ ,  $h$  и  $L$ , для различных начальных значений. На этих же графиках приведены точками оптимальные траектории, полученные в результате численного решения задачи оптимального управления [9–11].

Графики на рис. 1–3 получены при следующих начальных значениях:  $a - h(0) = 16,648$  км,  $\bar{b} - h(0) = 19,648$  км.

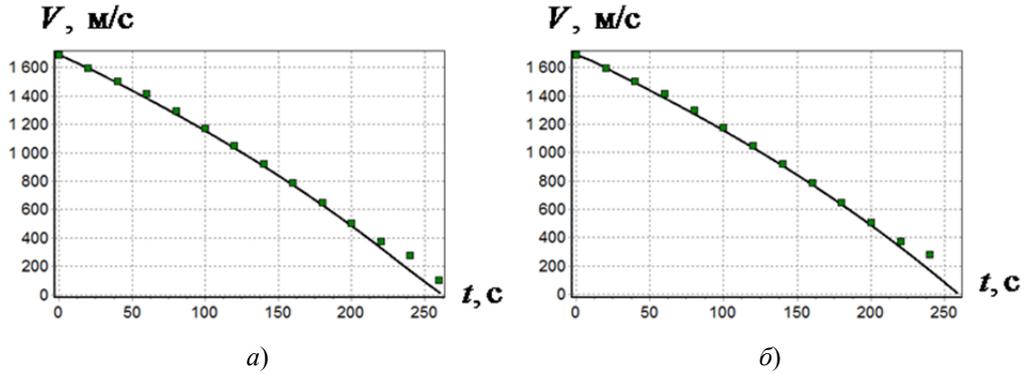


Рис. 1. Скорость КА

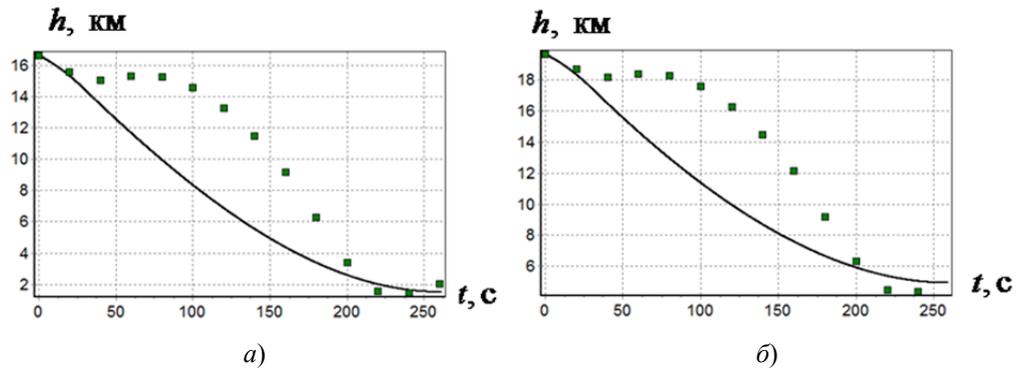


Рис. 2. Высота полета КА

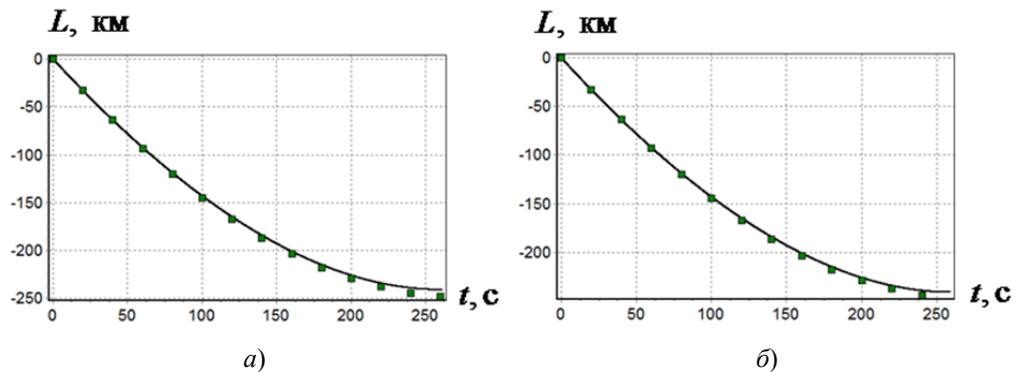


Рис. 3. Дальность полета КА

Из результатов моделирования видно, что полученная система управления обеспечивает движение вблизи оптимальных траекторий по скорости и дальности полета.

### Заключение

Наибольшее отличие от оптимальной траектории наблюдается по изменению высоты. Несмотря на то, что отклонение от оптимальной траектории по высоте достигало 6 км, терминальные условия выполняются достаточно точно: при  $h(0) = 16,648$  км,  $V(t_f) = 5,27$  м/с,  $h(t_f) = 1,758$  км,  $L(t_f) = -240,986$  км, при  $h(0) = 19,648$  км,  $V(t_f) = 5,45$  м/с,  $h(t_f) = 4,931$  км,  $L(t_f) = -240,955$  км.

**Список литературы**

1. Дивеев, А. И. Метод сетевого оператора / А. И. Дивеев. – М. : ВЦ РАН, 2010. – 178 с.
2. Дивеев, А. И. Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями / А. И. Дивеев // Известия РАН ТИСУ. – 2012. – № 2. – С. 63–78.
3. Дивеев, А. И. Метод сетевого оператора и его применение в задачах управления / А. И. Дивеев, Е. А. Софронова. – М. : Изд-во РУДН, 2012. – 182 с.
4. Дивеев, А. И. Повышение качества систем управления на основе многокритериального синтеза методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, К. А. Пупков, Е. А. Софронова // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». – 2009. – № 4. – С. 5–12.
5. Diveyev, A. I. Application of network operator method for synthesis of optimal structure and parameters of automatic control system / A. I. Diveyev, E. A. Sofronova // Proceedings of 17-th IFAC World Congress (05.07.2008 – 12.07.2008). – Seoul, 2008. – P. 6106–6113.
6. Diveyev, A. I. The Network Operator Method for Search of the Most Suitable Mathematical Equation. Chapter in the book Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications / A. I. Diveyev, E. A. Sofronova ; ed. by Shangce Gao // Intech. Printed. – 2012. – February. – P. 19–42.
7. Дивеев, А. И. Синтез управления спуском космического аппарата на поверхность Луны методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, К. А. Пупков, Е. А. Софронова // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2013. – № 4. – С. 14–29.
8. Дивеев, А. И. Вариационный генетический алгоритм для решения задачи оптимального управления / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/115-11474>.
9. Дивеев, А. И. Синтез системы управления мобильным роботом методом интеллектуальной эволюции / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 52–59.
10. Дивеев, А. И. Численный метод вариационного генетического программирования для синтеза системы управления мобильного робота / А. И. Дивеев, С. И. Ибадулла // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 30–35.
11. Дивеев, А. И. Метод вариационного аналитического программирования для решения проблемы синтеза системы управления / А. И. Дивеев, Н. Б. Коньрбаев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 188–193.

**Дивеев Асхат Ибрагимович**

доктор технических наук,  
начальник отдела безопасности  
и нелинейного анализа,  
Учреждение Российской академии наук,  
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН  
(119333, Россия, г. Москва, Вавилова 40)  
E-mail: [aidiveev@mail.ru](mailto:aidiveev@mail.ru)

**Шмалько Елизавета Юрьевна**

кандидат технических наук,  
научный сотрудник,  
отдел безопасности и нелинейного анализа,  
Учреждение Российской академии наук,  
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН  
(119333, Россия, г. Москва, Вавилова 40)  
E-mail: [asiedora@mail.ru](mailto:asiedora@mail.ru)

**Аннотация.** Рассматривается задача синтеза системы управления. Для решения задачи используется вычислительный метод сетевого оператора. В работе рассмотрен подход решения задачи синтеза на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий. На первом этапе решаются численно задачи оптимального управления для различных начальных значений из заданной области. При решении задач оптимального управления используется вариационный генетический алгоритм. На втором этапе решается методом сетевого оператора задача

**Diveev Askhat Ibragimovich**

doctor of technical sciences, head of department  
of safety and nonlinear analysis,  
Dorodnicyn Computer Center  
of the Russian academy of sciences  
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

**Shmal'ko Elizaveta Yur'evna**

candidate of technical sciences,  
scientific worker,  
department of safety and nonlinear analysis,  
Dorodnicyn Computer Center  
of the Russian academy of sciences  
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

**Abstract.** The paper focuses on the problem of control system synthesis and a numerical method of the network operator is proposed to search a solution. The present paper describes an approach for control synthesis based on approximation of the set of optimal trajectories. Apart from a well-known approach when the stated control synthesis problem is solved directly by the method of network operator considering given criteria and terminal conditions, the present paper describes a two-stage synthesis. Firstly optimal controls are searched numerically for different initial conditions from some

аппроксимации полученного на первом этапе множества оптимальных траекторий. Приведен пример двухэтапного синтеза системы управления спуском космического аппарата на поверхность Луны.

**Ключевые слова:** синтез системы управления, оптимальное управление, генетический алгоритм, метод сетевого оператора, управление космическим аппаратом.

given set. The variational genetic algorithm is used to solve the problem of optimal control. The second stage makes an approximation of the previously received optimal trajectories by means of the network operator. An example illustrates the two-stage synthesis of a control system for a spaceship descent to the Moon.

**Key words:** control system synthesis, optimal control, genetic algorithm, method of network operator, spaceship control.

**УДК 62-50, 519-714**

**Дивеев, А. И.**

**Синтез системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 3–10.**

**ПОСТРОЕНИЕ ИСТИННЫХ КОРТЕЖЕЙ ПАРЕТО  
В ЗАДАЧАХ ГИПЕРВЕКТОРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ СИСТЕМ****В. В. Сафронов**

**Введение.** На практике все чаще приходится решать задачи гипервекторного ранжирования (ГВР) [1–6]. В работах [7, 8] осуществлены постановки задач ГВР, рассмотрены характерные особенности такого класса задач, дан метод решения, основанный на методе «жесткого» ранжирования. В свою очередь, отечественными и зарубежными учеными разработаны методы, которые широко применяются в прикладных задачах: анализа иерархий Т. Саати [9]; турнирной таблицы; Борда [10]; равномерной оптимальности; справедливого компромисса; идеальной точки в пространстве критериев [11], минимаксный [12, 13] и многие другие.

К сожалению, применение перечисленных и иных методов как для решения задач многокритериального ранжирования, а тем более задач многовекторного и гипервекторного ранжирования может привести к получению неэффективных решений. В соответствии с теоремой С. Карлина использование линейной свертки справедливо, когда множество векторных оценок строго выпукло, ограничено и замкнуто [14, 15], т.е. для очень узкого класса задач. На этот факт еще раз обратил внимание исследователей, применяющих для решения многокритериальных задач метод анализа иерархий, В. Д. Ногин. Им предложено вместо линейной свертки формировать нелинейную свертку [16]. Ю. Б. Гермейером доказана теорема о построении Парето-оптимальных решений для невыпуклых многокритериальных задач. Однако, как отмечено в [12, 14], если на частные критерии не накладывать никаких дополнительных ограничений, то решения, получаемые по Ю. Гермейеру, могут быть и не оптимальными по Парето. В [17] показано, что в число возможных решений входит и неэффективное решение.

Вместе с тем, применяя методы многокритериального, а тем более многовекторного и гипервекторного ранжирования, исследователь должен быть уверен в правильности полученного результата. Эту уверенность может дать корректное применение соответствующих теорем, сформулированных и доказанных отечественными и зарубежными учеными.

Однако:

- такая проверка может быть затруднена в силу различных причин;
- для решения многокритериальных задач часто применяют, особо не вникая в «тонкости», традиционные для данной организации методы, несмотря на то, что можно получить решение, которое не принадлежит множеству эффективных.

Возникает задача, каким образом, применяя свои «любимые» (известные, традиционные) или новые методы, уверенно получать корректные результаты. При этом используя, по возможности, простые, но надежные правила.

Для ее решения необходимо, на наш взгляд, рассмотреть корректность задачи гипервекторного ранжирования, разработать метод, позволяющий получать только эффективные решения задач гипервекторного ранжирования при использовании для его реализации различных методов многокритериального ранжирования.

Понятие «корректно поставленная задача» впервые введено французским математиком Жаком Адамаром в 1923 г. Большой вклад в развитие теории решения некорректно поставленных задач внес академик АН СССР А. Н. Тихонов [18]. Применительно к многокритериальным задачам вопросы корректности рассматривались, например, в работах [19, 20]. В частности, в [19] отмечено, что «под устойчивостью многокритериальной (векторной) задачи дискретной оптимизации будем понимать свойство не появления новых оптимумов Парето при «малых» возмущениях параметров исходной задачи...».

В настоящей статье:

- рассмотрена постановка задачи ГВР;
- сформулированы и доказаны теоремы, позволяющие подтвердить корректность решения задачи гипервекторного ранжирования при использовании в качестве опорного метода «жесткого» ранжирования;
- предложен специальный критерий, позволяющий решать задачи ГВР при применении методов многокритериального ранжирования, изначально приводящих к получению некорректных результатов при построении множества Парето. Использование сформулированного и доказанного критерия позволяет получать только эффективные решения.

Статья является продолжением работ автора, например, [21, 22].

### 1. Постановка задачи гипервекторного ранжирования

Введем необходимые в дальнейшем обозначения:  $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$  – множество систем;  $S_D \subseteq S$  – множество допустимых систем, для которых в зависимости от специфики системы должны выполняться некоторые дисциплинирующие условия: неравенства, равенства, логические условия и т.п.;  $K_{ejj}(S_\alpha)$  –  $i$ -й скалярный критерий  $j$ -й векторной компоненты, которая входит в многовекторную компоненту с номером  $\varepsilon$ , ( $\varepsilon = \overline{1, E}, j = \overline{1, r_\varepsilon}, i = \overline{1, r_{\varepsilon j}}$ ). Здесь  $E$  – число многовекторных компонент;  $r$  – число векторных компонент в многовекторной компоненте с номером  $\varepsilon$ ;  $r_{\varepsilon j}$  – число скалярных критериев в  $j$ -й векторной компоненте, которая, в свою очередь, входит в многовекторную компоненту с номером  $\varepsilon$ ;  $K_{ej}(S_\alpha) = \{K_{ejj}(S_\alpha), i = \overline{1, r_{\varepsilon j}}\}$ ,  $K_\varepsilon(S_\alpha) = \{K_{ej}(S_\alpha), j = \overline{1, r_\varepsilon}\}$ ,  $K(S_\alpha) = \{K_\varepsilon(S_\alpha), \varepsilon = \overline{1, E}\}$  – соответственно множество скалярных, векторных и многовекторных компонент, характеризующих систему  $S_\alpha \in S_D$ ;  $A_{ej} = \{a_{ejj}, i = \overline{1, r_{\varepsilon j}}\}$ ,  $A_\varepsilon = \{a_{ej}, j = \overline{1, r_\varepsilon}\}$ ,  $A = \{a_\varepsilon, \varepsilon = \overline{1, E}\}$  – соответственно множество коэффициентов важности скалярных, векторных и многовекторных компонент, причем  $\sum_{\varepsilon=1}^E a_\varepsilon = 1$ ,  $\sum_{j=1}^{r_\varepsilon} a_{ej} = 1$ ,

$\sum_{i=1}^{r_{\varepsilon j}} a_{ejj} = 1, j = \overline{1, r_\varepsilon}, \varepsilon = \overline{1, E}$ ;  $P = \{S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_n}^0\}$  – упорядоченное множество эффективных систем (кортеж Парето),  $P \subseteq S_D$ ; элементы кортежа ранжированы так, что выполняется условие  $S_{k_1}^0 \succ S_{k_2}^0 \succ \dots \succ S_{k_i}^0 \succ \dots \succ S_{k_n}^0$ , где « $\succ$ » – знак отношения доминирования,  $k_i \in \{1, 2, \dots, n\}$ .

Допустим, известны множества  $A, A_\varepsilon, A_{ej}, S_D, K_{ej}(S_\alpha), K_\varepsilon(S_\alpha), K(S_\alpha)$ , решающие правила, ( $\alpha = \overline{1, n}; \varepsilon = \overline{1, E}; j = \overline{1, r_\varepsilon}$ ). Требуется найти кортеж Парето  $P$ , для элементов которого справедливо

$$K(S_{k_i}^0) = \min_{S_\alpha \in S_D} K(S_\alpha), S_{k_i}^0 \in P. \quad (1)$$

### 2. Особенности применения некоторых методов для решения задачи гипервекторного ранжирования

**2.1. Метод «жесткого» ранжирования** [7, 8]. Без потери общности изложение будем проводить для систем  $S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}$ , свойства которых задают с помощью критериев  $K_j(S_\alpha), j = \overline{1, r}$ .

В ходе решения задачи будем анализировать множество упорядоченных пар систем  $S_k, S_l (k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l)$ , а результат анализа заносить в специальную оценочную матрицу  $\|C_{kl}\|$ . Сущность метода заключается в следующем:

1. На основе попарного сравнения систем  $S_k, S_l$  ( $k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l$ ) определяем элементы  $C_{kl}$  оценочной матрицы  $\|C_{kl}\|$ . Значения элементов  $C_{kl}$  подбирают таким образом, чтобы отсеять неэффективные системы.

К числу неэффективных систем отнесем варианты, у которых:

а) все значения критериев  $k$ -й системы хуже, чем у  $l$ -й системы, тогда полагаем  $C_{kl} = N_2 \gg 1$ ;

б) значения  $m$  ( $m < r$ ) критериев  $k$ -й системы хуже соответствующих значений критериев  $l$ -й системы при равных соответствующих значениях остальных критериев этих систем; тогда полагаем  $C_{kl} = N_3, 1 \ll N_3 < N_2$ .

Если же для систем  $k, l$  имеем лучшие, худшие и, возможно, равные критерии, то значение  $C_{kl}$  определим по методу, изложенному в [23, 24].

Обозначим  $N_{kl}^+, N_{kl}^-, N_{kl}^-$  – соответственно подмножества номеров лучших, худших и равных критериев для каждой пары вариантов систем  $S_k, S_l$  ( $k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l$ ). Будем осуществлять попарное сравнение систем  $S_k, S_l$  на основе анализа критериев  $K_j(S_k), K_j(S_l), j = \overline{1, r}$ . Для возможных значений подмножеств номеров  $N_{kl}^+, N_{kl}^-, N_{kl}^-$  введем следующие значения элементов оценочной матрицы  $\|C_{kl}\|$ :

$$\text{если } N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^- = \{\overline{1, r}\}, \text{ то } C_{kl} = 1, C_{lk} = 1; \quad (2)$$

$$\text{если } N_{kl}^+ = \{\overline{1, r}\}, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, \text{ то } C_{kl} = N_2, C_{lk} = 0; \quad (3)$$

$$\text{если } N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- = \{\overline{1, r}\}, N_{kl}^- = \emptyset, \text{ то } C_{kl} = 0, C_{lk} = N_2; \quad (4)$$

$$\text{если } N_{kl}^+ \neq \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, \text{ то } C_{kl} = N_3, C_{lk} = 0; \quad (5)$$

$$\text{если } N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, \text{ то } C_{kl} = 0, C_{lk} = N_3; \quad (6)$$

$$\text{если } N_{kl}^+ \neq \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, |N_{kl}^-| \geq 0, \quad (7)$$

то определим  $C_{kl}$  в виде [25]

$$C_{kl} = \sum_{j \in N_{kl}^+} a_j \cdot \left( \sum_{j \in N_{kl}^-} a_j \right)^{-1}, C_{lk} = C_{kl}^{-1}. \quad (8)$$

2. Для формулировки решающих правил введем характерные числа:  $H_l$  – количество элементов в  $l$ -м столбце оценочной матрицы, значения которых больше единицы;  $M_l$  – количество элементов в  $l$ -м столбце той же матрицы, значения которых меньше единицы;  $C_{kl \max}$  – максимальное значение элемента в  $l$ -м столбце матрицы  $\|C_{kl}\|$ .

3. Для реализации «жесткого» ранжирования перейдем от одношагового процесса поиска приоритетного расположения систем к многошаговому процессу [24].

#### Решающие правила «жесткого» ранжирования

3.1. Ранжирование необходимо проводить среди эффективных систем по шагам. Число шагов  $t \leq (n-1)$ .

3.2. На каждом шаге  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, n-1$ ) нужно:

– найти числа  $H_l^{(t)}, M_l^{(t)}, C_{kl \max}^{(t)}$  и определить лучшую систему  $S_j$  с минимальным значением  $H_j^{(t)}$  и  $C_{lj} \geq 1 \forall l \in \{\overline{1, n}\}, l \neq j$ ;

- номер  $j$  занести в множество  $P$ ;
- исключить из оценочной матрицы  $j$ -ю строку и  $j$ -й столбец.

Если системы с номерами  $l_j \in L_{k(t)} = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_{k(t)}\}$  имеют одинаковые минимальные значения  $H_{l_j}^{(t)}$ , то лучшей является система  $S_{l_j}$  с максимальным значением  $M_{l_j}^{(t)} = \max_{l_j \in L_{k(t)}} M_{l_j}^{(t)}$ .

3.3. Если системы с номерами  $l_j \in L_{k(t)} = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_{k(t)}\}$  имеют соответственно одинаковые значения  $H_{l_j}^{(t)}, M_{l_j}^{(t)}$ , то лучшей является система  $S_{l_j}$  с минимальным значением  $C_{l_j}^{(t)} = \min_{l_j \in L_{k(t)}} C_{kl, \max}^{(t)}$ .

3.4. Если лучшие системы имеют соответственно равные значения  $H_{l_j}^{(t)}, M_{l_j}^{(t)}, C_{kl, \max}^{(t)}$ , то такие системы считают эквивалентными.

**2.2. Минимаксный метод.** Минимаксный метод (метод подтягивания самого отстающего) обеспечивает наилучшее (наименьшее) значение наихудшего (наибольшего) из нормированных критериев [13]. При данном методе используется наименьшая априорная информация о назначении системы. В соответствии с минимаксным методом вместо  $r$  частных критериев  $K_j(S_\alpha), j = \overline{1, r}, S_\alpha \in S_D$  предлагается рассматривать один критерий вида

$$F(S_\alpha) = \min_{j=1, r} K_j(S_\alpha), S_\alpha \in S_D.$$

В качестве оптимальной системы выбирают такую систему  $S_\alpha^* \in S_D$ , для которой выполняется условие  $F(S_\alpha^*) = \max_{S_\alpha \in S_D} F(S_\alpha)$ .

Рассмотрим особенности применения метода при решении задач гипервекторного ранжирования.

*Методика решения задачи гипервекторного ранжирования  
с использованием минимаксного метода*

1. Провести анализ исходной информации, формирование критериев оценок систем.
2. Вычислить оценки векторных компонент. Ранжировать системы с использованием минимаксного метода по множеству скалярных критериев каждой векторной компоненты.
3. Построить частные кортежи Парето по векторным компонентам.
4. Ранжировать системы с использованием минимаксного метода по множеству векторных компонент.
5. Определить значения оценок многовекторных компонент и построить частные кортежи Парето по многовекторным компонентам.
6. Ранжировать системы с использованием минимаксного метода по множеству многовекторных компонент. Построить кортеж Парето.
7. Провести анализ результатов решения.
8. В случае необходимости уточнить исходные данные. Перейти к шагу 2. В противоположном случае перейти к шагу 9.
9. Конец решения.

**3. Критерий построения истинных кортежей Парето**

В [21, 22] и других работах автора проведена сравнительная оценка применения различных методов для решения задачи ГВР. В частности, получено:

1. При использовании метода ГВР, основанного на применении метода «жесткого» ранжирования, можно обоснованно строить множество эффективных решений.

2. При использовании метода ГВР, основанного на применении иных методов, в число возможных могут входить и неэффективные решения.

Для устранения этих проблем разработан специальный критерий. Для его формулировки введем необходимые определения.

**Определение 1.** *Опорный кортеж Парето*  $P$  – упорядоченное множество только эффективных вариантов, построенное в ходе решения задач многокритериального, многовекторного или гипервекторного ранжирования с использованием метода «жесткого» ранжирования.

**Определение 2.** *Псевдокортеж Парето*  $P_{nq}$  – упорядоченное множество эффективных и неэффективных вариантов, построенное в ходе решения задач многокритериального, многовекторного или гипервекторного ранжирования с использованием метода, отличного от МЖР,  $q = \overline{1, Q}$ . В частном случае в псевдокортеж Парето входят только эффективные варианты.

**Определение 3.** *Истинный кортеж Парето*  $P_{uq}$  – упорядоченное множество эффективных вариантов, построенное на основе псевдокортежа Парето, у которого исключены неэффективные варианты,  $q = \overline{1, Q}$ .

**Сформулированы теоремы о единственности и устойчивости решения задачи ГВР при применении МЖР. Единственность решения** подтверждается *Теоремой 1*.

*Теорема 1.* Если в  $l$ -м ( $l \in \{\overline{1, n}\}$ ) столбце оценочной матрицы максимальный элемент равен значению  $N_3$  или значению  $N_2$ , то  $l$ -й вариант системы не принадлежит множеству эффективных решений.

*Доказательство.* Из условия теоремы следует, что хотя бы для одного из вариантов  $k$  ( $k \in \{\overline{1, n}\}, k \neq l$ ) выполняется одно из условий (3), (5). Таким образом, вариант  $l$  доминируется вариантом  $k$ . Значит, согласно определению множества Парето  $l$ -й вариант не может принадлежать множеству эффективных решений. *Теорема доказана.*

Применение *Теоремы 1* позволяет для известной структуры исходных данных получать *единственное* множество Парето.

**Устойчивость решения** (относительно коэффициентов важности критериев) подтверждается *Теоремой 2* и *следствием из Теоремы 2*.

*Теорема 2.* Множество неэффективных систем не зависит от значений коэффициентов важности критериев.

*Доказательство.* Из теоремы 1 следует, что если  $l$ -й вариант принадлежит множеству неэффективных решений, то  $C_{kl \max} = N_3$  или  $C_{kl \max} = N_2$ . В этом случае хотя бы один из элементов  $C_{kl}$  оценочной матрицы принимает одно из значений:

–  $N_3$ , когда вариант системы  $k$  имеет по сравнению с вариантом системы  $l$  только лучшие и равные значения критериев (условие (5));

–  $N_2$ , когда вариант системы  $k$  имеет по сравнению с вариантом системы  $l$  только лучшие значения критериев (условие (3)).

Значения  $N_3$ ,  $N_2$  введены автономно и не зависят от коэффициентов важности критериев. *Теорема доказана.*

*Следствие из Теоремы 2.* Множество эффективных систем не зависит от значений коэффициентов важности критериев.

Допустим, что, используя МЖР, а также другие интересующие нас методы из заданного множества, построены соответственно опорный кортеж Парето  $P$  и  $q$  псевдокортежей  $P_{nq}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ .

*Критерий построения истинных кортежей Парето*  $P_{uq}$ ,  $q = \overline{1, Q}$

Для построения истинных кортежей Парето необходимо и достаточно из соответствующих псевдокортежей Парето выбрать, не нарушая порядок следования, лишь варианты, номера которых указаны в опорном кортеже Парето. Иначе

$$P_{uq} = (P_{nq} \cap P, q = \overline{1, Q}). \quad (9)$$

**Доказательство**

*Необходимость.* В соответствии с теоремой 1 в опорный кортеж Парето входят только эффективные варианты. Следовательно, выбор указанного кортежа является оправданным и необходимым условием решения задачи.

*Достаточность.* Выполнив операцию (9) в истинные кортежи Парето войдут лишь эффективные варианты, которые включены в опорный кортеж Парето, и никакие другие. Отличие, в общем случае, будет заключаться лишь в порядке следования эффективных вариантов, который зависит от конкретного решающего правила.

Для корректного решения задачи предлагается следующая *методика*.

1. Решить задачу ГВР с использованием методов «жесткого ранжирования» и иных методов, например, минимаксного. В результате:

а) по методу «жесткого ранжирования» будет построен опорный кортеж Парето  $P$  и определено подмножество неэффективных систем;

б) по иным методам будет построен псевдокортеж Парето  $P_{п1}$ .

2. С учетом информации об эффективных системах, которые имеются в опорном кортеже  $P$ , исключить из псевдокортежа  $P_{п1}$  неэффективные системы. В итоге получим истинный кортеж, в котором расположены только эффективные системы.

**4. Численный пример. Построение кортежей Парето для систем контроля и управления**

На основе предлагаемого подхода решена задача ранжирования шестнадцати вариантов систем контроля и управления, позволяющих проводить проверки систем летательных аппаратов на различных этапах эксплуатации.

*Дано:* шестнадцать возможных вариантов систем контроля и управления. Каждый из вариантов характеризуется множеством критериев: тремя многовекторными компонентами, семью векторными компонентами, двадцатью тремя скалярными критериями.

*Необходимо:*

- 1) построить опорный кортеж Парето, используя метод «жесткого ранжирования»;
- 2) с использованием методов минимаксного, Борда и равномерной оптимальности построить псевдокортежи  $P_{п1}$ ,  $P_{п2}$ ,  $P_{п3}$  Парето;
- 3) построить истинные кортежи  $P_{п1}$ ,  $P_{п2}$ ,  $P_{п3}$  Парето, используя разработанный критерий;
- 4) сделать выводы.

Результаты решения задачи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты решения задачи выбора наилучшего варианта системы контроля и управления

Применяемый метод	Опорный кортеж Парето	Псевдокортеж Парето	Истинный кортеж Парето
«Жесткого» ранжирования	$S_{44}, S_{43}$	–	$P = \langle S_{44}, S_{43} \rangle$
Минимаксный	–	$P_{п1} = \langle S_{41}, S_{42}, S_{34}, S_{24}, S_{14}, S_{33}, S_{32}, S_{31}, S_{23}, S_{22}, S_{21}, S_{13}, S_{12}, S_{44}, S_{43}, S_{11} \rangle$	$P_{п1} = \langle S_{44}, S_{43} \rangle$
Борда	–	$P_{п2} = \langle S_{43}, S_{41}, S_{42}, S_{13}, S_{33}, S_{34}, S_{14}, S_{31}, S_{23}, S_{24}, S_{12}, S_{21}, S_{32}, S_{44}, S_{22}, S_{11} \rangle$	$P_{п2} = \langle S_{43}, S_{44} \rangle$
Равномерной оптимальности	–	$P_{п3} = \langle S_{14}, S_{13}, S_{41}, S_{11}, S_{44}, S_{12}, S_{31}, S_{43}, S_{21}, S_{24}, S_{34}, S_{23}, S_{42}, S_{33}, S_{22}, S_{32} \rangle$	$P_{п3} = \langle S_{44}, S_{43} \rangle$

В результате ранжирования вариантов модернизации по множеству многовекторных компонент получен кортеж Парето:  $P = \langle S_{44}, S_{43} \rangle$ . Остальные варианты модернизации оказались неэффективными.

Нетрудно видеть, что если для решения задачи применять методы минимаксный, Борда и равномерной оптимальности, то в псевдокортеж Парето могут попасть и заведомо неэффективные

системы. Более того, эффективные системы могут располагаться после неэффективных (например, неэффективные системы  $S_{41}, S_{42}, S_{34}, S_{24}, S_{14}, S_{33}, S_{32}, S_{31}, S_{23}, S_{22}, S_{21}, S_{13}, S_{12}$  соответственно на первом–тринадцатом местах перед эффективными системами  $S_{44}, S_{43}$  в псевдокортеже  $P_{п1}$ ; неэффективные системы  $S_{41}, S_{42}, S_{13}, S_{33}, S_{34}, S_{14}, S_{31}, S_{23}, S_{24}, S_{12}, S_{21}, S_{32}$  соответственно на втором–тринадцатом местах перед эффективной системой  $S_{44}$  в псевдокортеже  $P_{п2}$ ; неэффективные системы  $S_{14}, S_{13}, S_{41}, S_{11}$  соответственно на первом – четвертом местах перед эффективной системой  $S_{44}$  в псевдокортеже  $P_{п3}$ ).

Применяя предлагаемый критерий, получим истинные кортежи Парето  $P_{и1} = \langle S_{43}, S_{44} \rangle$ ,  $P_{и2} = \langle S_{43}, S_{44} \rangle$ ,  $P_{и3} = \langle S_{44}, S_{43} \rangle$ , в которые входят только эффективные системы.

### Заключение

1. Многие методы решения многокритериальных задач являются некорректными. Получаемое в результате их применения множество эффективных вариантов не является таковым. Необходимо решить проблему построения множества эффективных решений при использовании различных методов многокритериального ранжирования.

2. Рассмотрен метод «жесткого» ранжирования, который служит основой методов многокритериального, многовекторного и гипервекторного ранжирования. Доказаны теоремы о единственности и устойчивости решения. Введено понятие опорного, псевдо- и истинного кортежей Парето.

3. Для получения корректных решений при использовании различных методов многокритериального ранжирования необходимо строить истинные кортежи Парето. С этой целью сформулирован и доказан специальный критерий построения таких кортежей.

### Список литературы

1. Воронов, Е. М. Многокритериальное комплексирование облика сложной системы управления на основе гипервекторного выбора / Е. М. Воронов, А. А. Карпунин // Интеллектуальные системы : тр. Десятого Междунар. симп. / под ред. К. А. Пупкова. – М. : РУСАКИ, 2012. – С. 338–342.
2. Воронов, Е. М. Многокритериальное комплексирование облика сложной системы управления на основе гипервекторного выбора / Е. М. Воронов, А. А. Карпунин // Интеллектуальные системы : тр. Десятого Междунар. симп. / под ред. К. А. Пупкова. – М. : РУСАКИ, 2012. – С. 338–342.
3. Клеванский, Н. Н. Основные концепции реализации задач формирования расписаний / Н. Н. Клеванский // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2 (5). – С. 9–21.
4. Решение задач совершенствования системы образования с использованием методов ранжирования / В. В. Сафронов, И. В. Григорьев, А. В. Ткачук, А. В. Попов // Информационные технологии. – 2008. – № 11. – С. 52–57.
5. Сафронов, В. В. Метод построения эффективных моделей разработки программного обеспечения / В. В. Сафронов, О. Н. Федорев // Информационные технологии. – 2010. – № 1. – С. 34–39.
6. Сафронов, В. В. Выбор стенда для проведения огневых испытаний демонстратора пульсирующего детонационного прямого двигателя / В. В. Сафронов, А. С. Жебраков, В. А. Поршнева // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 9. – С. 65–70.
7. Сафронов, В. В. Гипервекторное ранжирование сложных систем / В. В. Сафронов // Информационные технологии. – 2003. – № 5. – С. 23–26.
8. Сафронов, В. В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования : моногр. / В. В. Сафронов. – Саратов : Научная книга, 2009. – 329 с.
9. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
10. Трахтенгерц, Э. А. Компьютерная поддержка принятия согласованных решений / Э. А. Трахтенгерц // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2002. – № 3. – 24 с.
11. Дубов, Ю. А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю. А. Дубов, С. И. Травкин, В. Н. Якимец. – М. : Наука, 1986. – 296 с.
12. Гермейер, Ю. Б. Введение в теорию исследования операций / Ю. Б. Гермейер. – М. : Наука, 1971. – 383 с.
13. Гуткин, Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств / Л. С. Гуткин. – М. : Сов. радио, 1975. – 368 с.
14. Захаров, И. Г. Обоснование выбора. Теория практики / И. Г. Захаров. – СПб. : Судостроение, 2006. – 528 с.
15. Карлин, С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике / С. Карлин. – М. : Сов. радио, 1964. – 838 с.

16. Ногин, В. Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев / В. Д. Ногин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2004. – Т. 44, № 7. – С. 1259–1268.
17. Михалевич, В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. – М. : Наука, 1982. – 286 с.
18. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 284 с.
19. Емеличев, В. А. О регуляризации многокритериальной задачи целочисленного линейного программирования / В. А. Емеличев, О. А. Янушкевич // Известия вузов. Серия «Математика». – 1999. – № 12 (451). – С. 38–42.
20. Молодцов, Д. А. Регуляризация множества точек Парето / Д. А. Молодцов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1978. – Т. 18, № 3. – С. 597–602.
21. Сафронов, В. В. Применение метода идеальной точки в пространстве критериев для решения задачи гипервекторного ранжирования / В. В. Сафронов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2010. – Т. 1. – С. 12–14.
22. Сафронов, В. В. Сравнительная оценка методов «жесткого» ранжирования и анализа иерархий в задаче гипервекторного ранжирования систем / В. В. Сафронов // Информационные технологии. – 2011. – № 7. – С. 8–13.
23. Белкин, А. Р. Принятие решений: комбинаторные модели аппроксимации информации / А. Р. Белкин, М. Ш. Левин. – М. : Наука, 1990. – 160 с.
24. Сафронов, В. В. Методика построения истинных кортежей Парето в задачах гипервекторного ранжирования систем / В. В. Сафронов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 62–66.
25. Руа, Б. К вопросу принятия многокритериального решения / Б. К. Руа // Перевод № А-10849. – М. : Всесоюзный центр переводов научно-технической литературы и документации, 1977. – 10 с.

**Сафронов Валерий Васильевич**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
Конструкторское бюро «Электроприбор»  
(410065, Россия, г. Саратов,  
2-й Красноармейский тупик, 3)  
8-(452)-63-36-10  
E-mail: svv@kber.ru

**Safronov Valeriy Vasil'evich**

doctor of technical sciences, professor,  
senior researcher manager,  
Design department «Electropribor»  
(410065, 3, 2-d Krasnoarmeisky tupic street,  
Saratov, Russia)

**Аннотация.** Поставлена задача гипервекторного ранжирования систем. Сформулированы и доказаны теоремы, позволяющие подтвердить корректность решения задачи гипервекторного ранжирования при использовании в качестве опорного метода «жесткого» ранжирования. Введены понятия опорного, истинного и псевдокортежей Парето. Предложен специальный критерий построения истинных кортежей Парето, позволяющий корректно решать задачи гипервекторного ранжирования при применении различных методов многокритериального ранжирования. Приведен численный пример.

**Ключевые слова:** гипервекторное ранжирование, многокритериальная задача, критерии, опорный, псевдо- и истинный кортежи Парето.

**Abstract.** The task of the systems hypervector ranging has been set. Theorems were formulated and proven, which allow to confirm the correctness of hypervector ranging task solution by using of the «hard» ranging method as a reference method. The concepts of the reference, true and pseudo Pareto tuples were introduced. The special criterion of building the true Pareto tuples was proposed, allowing to solve correctly the problems of hypervector ranging by using of different methods of multicriteria ranging. A numerical example was given.

**Key words:** hypervector ranging, multicriteria task, criteria, reference, pseudo and true Pareto tuples.

УДК 519: 816

**Сафронов, В. В.**

**Построение истинных кортежей Парето в задачах гипервекторного ранжирования систем / В. В. Сафронов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 11–18.**

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.3.049.75

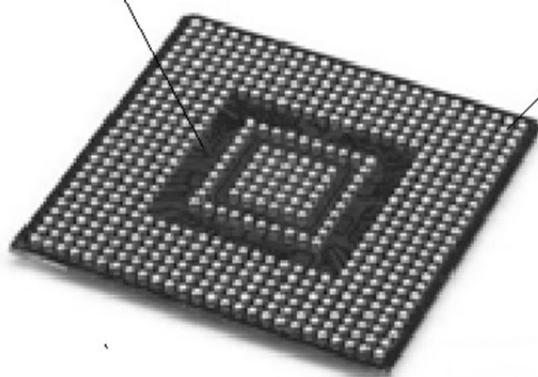
## ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КРИТЕРИЕВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. Н. Гриднев, Ж. А. Миронова, В. А. Шахнов

### *Введение*

Согласно прогнозу технологической дорожной карты ИРС по коммутационным изделиям в электронике [1] в ближайшие годы будет сохраняться тенденция увеличения плотности компоновки проводящего рисунка коммутационных плат. Интеграция и совершенствование технологии корпусирования полупроводниковых компонентов приводит к большому количеству выводов, расположенных в виде матрицы, как показано на рис. 1, уже превышающих 1500 шт., с шагом до 0,5 мм.

**нижняя сторона ПМК**



**шариковый вывод**

Рис. 1. Поверхностно-монтажный компонент (ПМК) с выводами, расположенными в виде матрицы

Плотность компоновки контактных площадок (КП) посадочного места под такие компоненты может достигать 400 шт./см<sup>2</sup>, а зазор между ними 0,25 мм. При этом разводка проводников от монтажных КП внутреннего периметра матрицы не всегда реализуема на одном внешнем слое платы из-за блокировки и ограничения ширины каналов трассировки. Решение проблемы заключается в создании переходных отверстий от монтажных КП на нижележащие слои платы [2].

Монтаж ПМК непосредственно на переходные отверстия коммутационной платы может послужить причиной некачественного паяного соединения в связи с возможностью ухода припоя в

отверстие и образования пустот [3], как показано на рис. 2. Что не приемлемо в изделиях специального назначения.

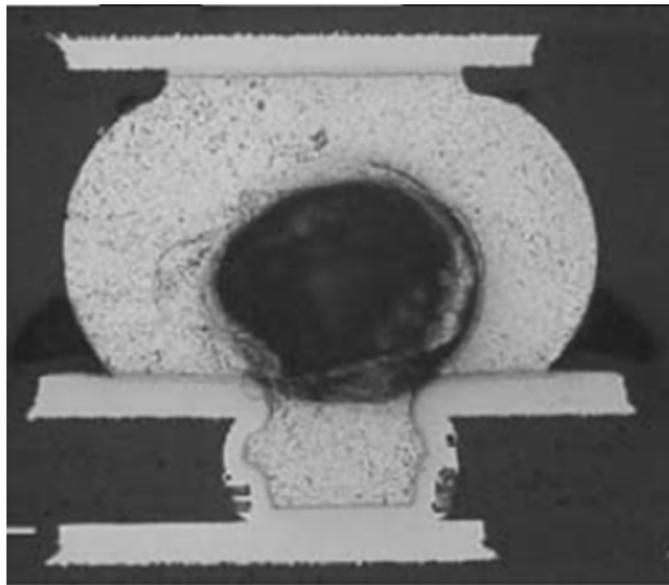


Рис. 2. Некачественное паяное соединение

Таким образом, уменьшение размеров печатных элементов и увеличение их плотности компоновки на плате ответственного назначения требует определенной конструкции посадочного места ПМК для обеспечения соответствующего качества.

### **1. Обеспечение качества паяных соединений ПМК с шагом выводов более 0,8 мм**

Для обеспечения качества паяных соединений конструкция посадочного места ПМК с шагом более 0,8 мм на коммутационной плате с металлизированными сквозными отверстиями (МСО) может представлять собой создание переходов от монтажных КП на нижележащие слои типа «dog bone», т.е. дублирование монтажной КП параллельной КП с переходным отверстием [3]. Схема посадочного места ПМК представлена на рис. 3.

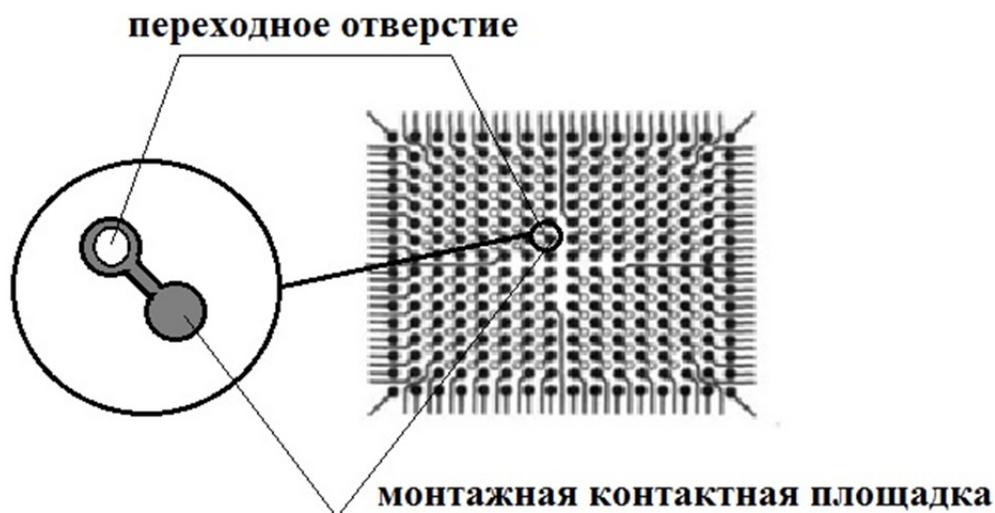


Рис. 3. Схема КП посадочного места ПМК и переходов «dog bone»

При таком традиционном конструктивном решении разводка проводников от ПМК с шагом менее 0,8 мм становится затруднительной или невозможной в связи с нехваткой расстояния для надежного формирования переходных отверстий между монтажными КП.

## 2. Обеспечение качества паяных соединений ПМК с шагом выводов менее 0,8 мм

Уменьшение шага выводов ПМК не позволяет создавать переходы типа «dog bone», и дальнейшее увеличение плотности компоновки монтажных КП коммутационной платы возможно с помощью совмещения монтажных КП с переходными отверстиями [4]. При этом для того, чтобы обеспечить требуемое качество, необходимо заполнить переходные отверстия материалом с коэффициентом теплового расширения, близким к материалам самой платы, а затем провести операцию планаризации поверхности [5] и создания монтажных КП непосредственно на заполненных металлизированных отверстиях, как показано на рис. 4.

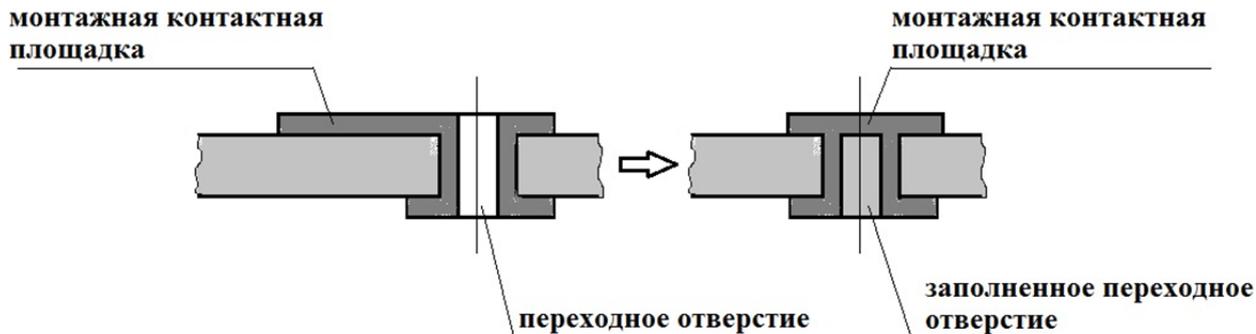


Рис. 4. Совмещение монтажной КП и переходного отверстия

Таким образом, применение конструкции заполненных переходных отверстий, совмещенных с монтажными КП, позволяет увеличить плотность монтажных КП до 2,5 раз по сравнению с традиционной конструкцией переходов «dog bone» [6].

## 3. Обеспечение качества паяных соединений ПМК с шагом выводов менее 0,65 мм

Конструкция посадочного места ПМК с монтажными КП диаметром 0,30 мм с шагом 0,65 мм и менее не позволяет расположить между КП ни одного проводника шириной 0,10 мм. Трассировка такой коммутационной платы возможна за счет применения глухих вместо сквозных переходных отверстий, так как в случае глухих отверстий на каждом слое коммутационной платы для трассировки проводников освобождается область внешних периметров матрицы КП, как показано на рис. 5.

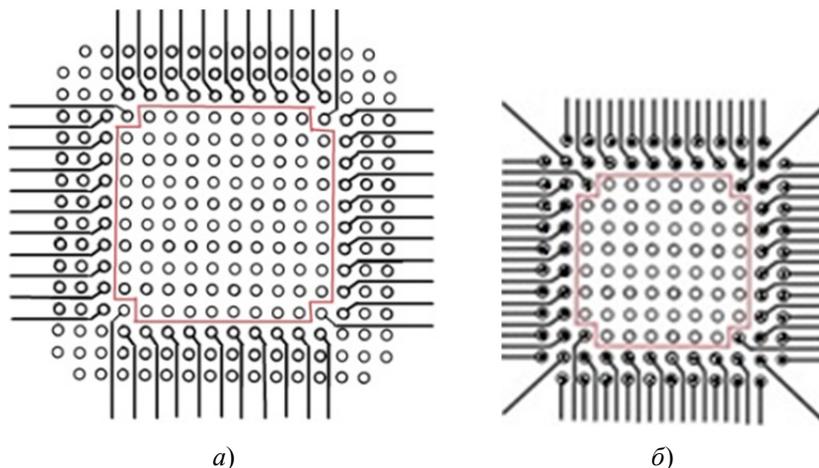


Рис. 5. Трассировка проводников на внутреннем слое платы:  
а – МСО; б – с применением глухих отверстий

Конструкция платы с заполненными глухими металлизированными отверстиями представлена на рис. 6. Межслойные переходы реализуются в соосно расположенных микроотверстиях согласно технологии послойного наращивания на ядро платы МСО [7].

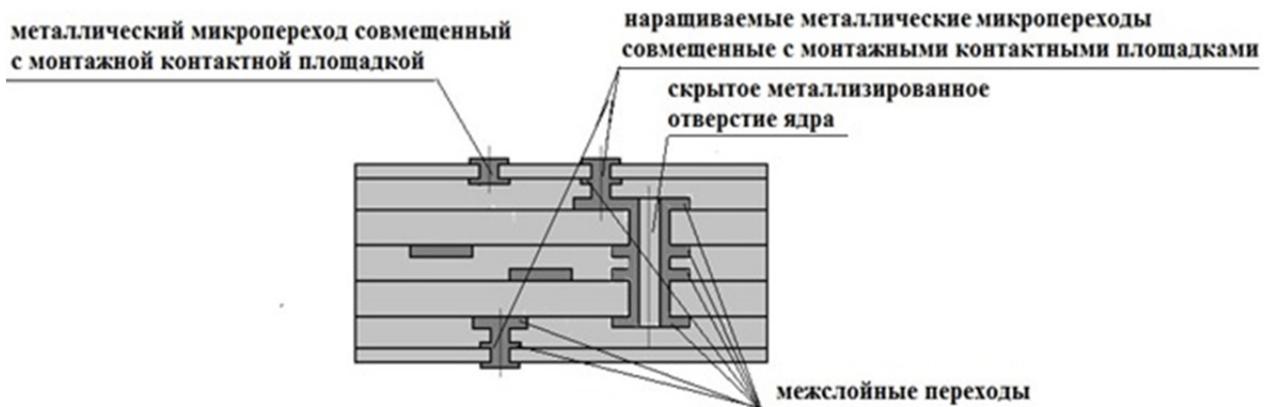


Рис. 6. Коммутационная плата с глухими отверстиями

Необходимо отметить, что для наращиваемых слоев данная технология предполагает использование неармированных базовых материалов, что может негативно сказаться на сроке активного существования изделия.

Таким образом, для обеспечения высокой плотности межсоединений многослойных коммутационных плат ответственного назначения в случае трассировки проводников от КП посадочного места ПМК с шагом выводов менее 0,65 мм необходимо проектировать глухие межсоединения непосредственно из монтажных КП, при этом технология изготовления плат должна обеспечивать соосность, заполнение глухих металлизированных отверстий и применение армированных базовых материалов.

В ОАО «Российские космические системы» А. Л. Зарубиным, А. В. Павловым, И. И. Степановым, Ж. А. Мироновой был разработан новый способ изготовления высокоплотных плат [8], конструкция которых позволяет проектировать глухие металлизированные отверстия с отношением глубины к диаметру отверстия меньше, чем 10:1. Переход на нижележащие слои платы осуществляется непосредственно из монтажных КП за счет их совмещения с заполненными материалом прокладочной стеклоткани металлизированными отверстиями в соответствии с рис. 7. При этом данная технология предполагает использование традиционных базовых армированных материалов и обеспечивает монтаж ПМК с шагом выводов до 0,5 мм с применением базового комбинированного позитивного метода изготовления плат.

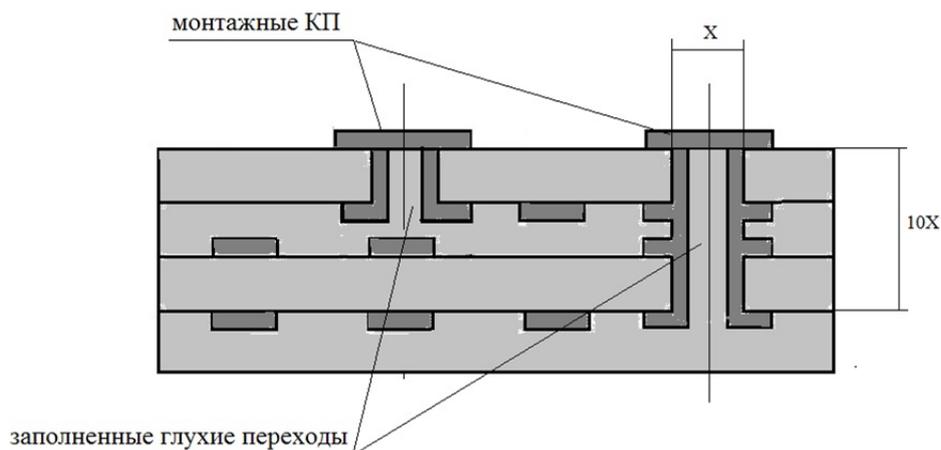


Рис. 7. Конструкция платы, реализуемая с помощью разработанной технологии

Таким образом, заявленное изобретение позволяет обеспечить требуемое качество и высокую плотность межсоединений коммутационной платы.

При анализе показателей качества на предприятии различными методами обрабатываются большие объемы данных [9]. Различные показатели качества одновременно регистрируются на разных этапах производства и различными средствами контроля качества. А это означает, что при

ответственном производстве или больших выборках контролируемых изделий массивы данных увеличиваются в разы. Автоматизация анализа статистических данных входного контроля является важной задачей, так как это способствует не только улучшению качества продукции, но и повышению уровня технологичности производства [10–12].

Внедрение системы качества на предприятии – длительный и дорогой процесс, который требует больших материальных затрат и огромную работу с персоналом. Проектирование высоконадежных коммутационных структур высокоплотной компоновки – один из наиболее проблемных моментов в создании систем специального назначения. Даже локальное решение проблем качества на данном участке производства внесет значительный вклад в общее качество выпускаемой продукции.

Чем раньше будут скорректированы закладываемые в продукт параметры качества, тем меньше времени и средств потребуется для получения конечного продукта с заданными параметрами качества. С другой стороны, чем на более позднем этапе жизненного цикла продукта будет проведена корректировка параметров качества, тем больше средств это потребует. Для отработки проблем качества целесообразно использовать на всех этапах элементы визуального управления инструментами качества [13–15].

### *Заключение*

Качество паяного соединения ПМК, в том числе и платы с высокоплотной компоновкой КП, определяется конструкцией посадочного места. Уход припоя в переходные отверстия при шаге КП более 0,8 мм возможно предотвратить с помощью создания переходов от монтажных КП на нижележащие слои типа «dog bone». Применение конструкции заполненных переходных отверстий совмещенных с монтажными КП позволяет обеспечить качество паяных соединений с шагом менее 0,8 мм. В случае невозможности размещения проводника между КП матрицы посадочного места ПМК платы ответственного назначения необходимо создавать глухие заполненные переходные отверстия, например по разработанной технологии в ОАО «Российские космические системы».

### *Список литературы*

1. Кумбз, К. Ф. Печатные платы : справочник : в 2 кн. / К. Ф. Кумбз ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2011. – Кн. 1. – 1016 с.
2. IPC-7095 Design and assembly process implementation for BGAs – Association connecting electronics industries. – 2003. – 88 p.
3. Нинг-Ченг Ли. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip chip технологии / Нинг-Ченг Ли ; пер. с англ. – М. : Технологии, 2006. – 392 с.
4. Миронова, Ж. А. Высокоплотная компоновка межсоединений многослойных коммутационных плат / Ж. А. Миронова // Научно-технические системы : сб. докладов XVI молодежной междунар. науч.-техн. конф. – М. : МГТУ им. Баумана, 2014. – С. 213–218.
5. Торстен, Р. Новые технологии заполнения отверстий и последующей планаризации / Рекерт Торстен. – М. : Технологии в электронной промышленности, 2005. – 56 с.
6. Миронова, Ж. А. Высокоплотная компоновка проводящего рисунка многослойных коммутационных плат / Ж. А. Миронова, В. А. Шахнов, В. Н. Гриднев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 6. – С. 56–65.
7. Медведев, А. Обновление технологий в российской электронной промышленности / А. Медведев. – М. : Технологии в электронной промышленности, 2005 – 56 с.
8. Патент № 2013125061 РФ «Способ изготовления многослойной печатной платы сверхплотного монтажа / Зарубин А. Л., Павлов А. В., Степанов И. И., Миронова Ж. А. – Заявл. от 29.05.2013.
9. Власов, А. И. Системный анализ технологических процессов производства сложных технических систем с использованием визуальных моделей / А. И. Власов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 10, ч. 2. – С. 17–26.
10. Власов, А. И. Визуальные модели управления качеством на предприятиях электроники / А. И. Власов, А. М. Иванов // Наука и образование. – 2011. – № 11. – С. 34.
11. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др. ; под общ. ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 568 с. – (Информатика в техническом университете; изд. 2-е).

12. Еланцев, А. В. Автоматизированный контроль и испытания электронной аппаратуры / А. В. Еланцев, В. В. Маркелов. – М. : Изд-во МГТУ, 1990. – 51 с.
13. Маркелов, В. В. Системный анализ процесса управления качеством изделий электронной техники / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Э. Н. Камышная // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 35–42.
14. Маркелов, В. В. Функциональная визуальная модель контроля качества ЭС / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Д. Е. Зотьева // Проектирование и технология электронных средств. – 2014. – № 1. – С. 25–30.
15. Маркелов, В. В. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Д. Е. Зотьева // Датчики и системы. – 2014. – № 8. – С. 55–67.
16. Увайсов, С. У. Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель / С. У. Увайсов, С. П. Сулейманов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 109–118.
17. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных технических систем / Н. К. Юрков, В. А. Ермолаев, Ю. А. Романенко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 46–49.

**Гриднев Владимир Николаевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра проектирования и технологии производства  
электронной аппаратуры,  
Московский государственный  
технический университет им. Н. Э. Баумана  
(105005, Россия, г. Москва,  
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)  
8-(499)-263-65-53  
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

**Миронова Жанна Алексеевна**

аспирант,  
кафедра проектирования и технологии производства  
электронной аппаратуры,  
Московский государственный  
технический университет им. Н. Э. Баумана  
(105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)  
8-(965)-166-10-08  
e-mail: zhannampe@mail.ru

**Шахнов Вадим Анатольевич**

заслуженный деятель науки РФ,  
член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой проектирования  
и технологии производства электронной аппаратуры,  
Московский государственный  
технический университет им. Н. Э. Баумана  
(105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)  
8-(499)-263-65-53,  
E-mail: shakhnov@iu4.bmstu.ru

**Аннотация.** Проанализированы возможности обеспечения качества паяных соединений посадочного места поверхностно-монтируемых компонентов (ПМК) с большим количеством (более 500) выводов, расположенных в виде матрицы с шагом до 0,5 мм. Основное внимание уделено вопросу предотвращения ухода припоя в переходные отверстия коммутационной платы. Приведены конструкции высокоплотной компоновки монтажных контактных пло-

**Gridnev Vladimir Nikolaevich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of design and the production technology  
of the electronic equipment,  
Moscow State Technical University  
named after N. E. Bauman  
(105005, 2-ya Baumanskaya street, apartment 5, page 1,  
Moscow, Russia)

**Mironova Zhanna Alekseevna**

postgraduate student,  
sub-department of design and the production technology  
of the electronic equipment,  
Moscow State Technical University  
named after N. E. Bauman  
(105005, 2-ya Baumanskaya street, apartment 5, page 1,  
Moscow, Russia)

**Shakhnov Vadim Anatol'evich**

honored worker of science of the Russian Federation,  
corresponding member of the Russian Academy  
of Sciences, doctor of technical sciences, professor,  
head of sub-department of design and production  
technology of the electronic equipment,  
Moscow State Technical University  
named after N. E. Bauman  
(105005, 2-ya Baumanskaya street, apartment 5, page 1,  
Moscow, Russia)

**Abstract.** The IC chip feature sizes and contact pads have been constantly reduced. Thus, the continuing increase in component performance and lead density, along with the reduction in package sizes, have required that PCB technology find ways to increase the interconnection density of the substrate. The main attention is paid to a question that serves as a protection from nursing of the solder in the through holes. and low. The described constructions for increase density interconnec-

щадок коммутационных плат ответственного назначения.

**Ключевые слова:** многослойная коммутационная плата, уход припоя в отверстие, посадочное место поверхностно-монтируемого компонента, заполненные переходные отверстия.

tions of PCB are designed for high quality soldering.

**Key words:** multilayer wiring board, quality soldering, design wiring board for BGA, filling hole.

УДК 621.3.049.75

*Гриднев, В. Н.*

**Обеспечение качества компоновки монтажных контактных площадок высокоплотной коммутационной платы** / В. Н. Гриднев, Ж. А. Миронова, В. А. Шахнов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 19–25.

## ПРОВОДИМОСТЬ ГРАФЕНА В ТЕРАГЕРЦОВОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ<sup>1</sup>

О. А. Голованов, Г. С. Макеева, В. В. Вареница

### *Введение*

Теоретическое исследование графена началось задолго до получения реальных образцов материала. Двумерную форму углерода, описанную теоретически более 60 лет назад, долго не удавалось получить практически, поскольку считалось, что двумерные кристаллы не могут существовать из-за своей нестабильности. В 2004 г. совместными усилиями ученых Манчестерского университета (Великобритания) под руководством А. Гейма и Российского Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых металлов в Черноголовке под руководством К. Новоселова удалось получить и воспроизвести структуру графена. За открытие графена и опыты с 2D-материалом А. К. Гейму и К. С. Новоселову присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 г. [1].

Графен обладает уникальными электронными и оптическими свойствами для применений в широком диапазоне рабочих частот, перекрывающих спектр от радиочастот, микроволн до оптического диапазона.

Целью данной работы является расчет поверхностной проводимости монослоя графена, определяемой формулой Кубо, в модели, учитывающей внутри- и межзонную проводимости, при различных значениях химического потенциала, изменяющегося при приложении внешнего электрического поля, в терагерцовом (ТГц) и инфракрасном (ИК) диапазонах частот.

### *1. Физическая модель*

Графен (англ. *graphene*) – слой атомов углерода, соединенных посредством *sp*-связей в гексагональную 2D кристаллическую решетку с расстоянием между двумя соседними атомами углерода в 0,142 нм (рис. 1) [2].

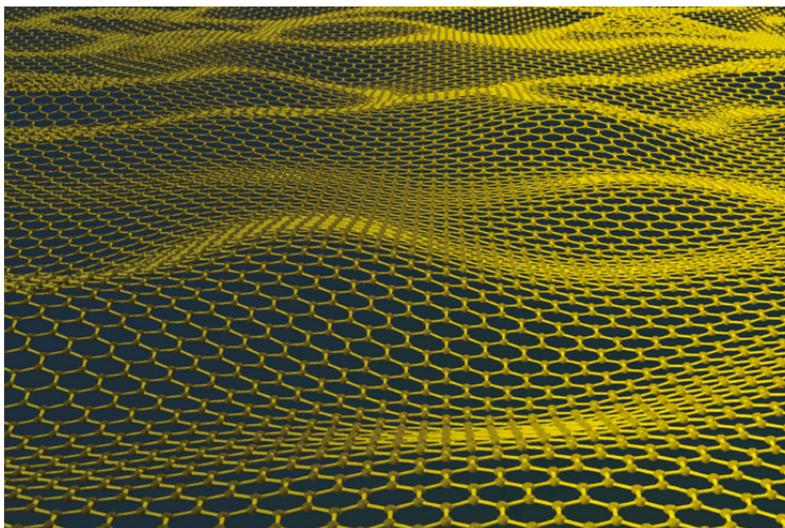


Рис. 1. Графен – слой атомов углерода, соединенных посредством *sp*-связей в гексагональную 2D кристаллическую решетку [2]

<sup>1</sup> Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований грант № 12-02-97025-р\_поволжье\_а.

Графен нельзя отнести ни к металлам, ни к полупроводникам, ни, тем более, к диэлектрикам. В отличие от металлов, у которых зависимость энергии квазичастиц от импульса при движении в зоне проводимости (закон дисперсии) можно считать квадратичным (энергия квазичастиц прямо пропорциональна квадрату импульса), у графена закон дисперсии существенно отличается. Графен – это полуметалл.

Кристаллическая структура графена состоит из двух эквивалентных подрешеток, что приводит к образованию двух энергетических зон и двух «конических» точек на уровне нулевого заряда носителей  $K$  и  $K'$ , в которых валентная зона и зона проводимости соприкасаются (рис. 2) [1].

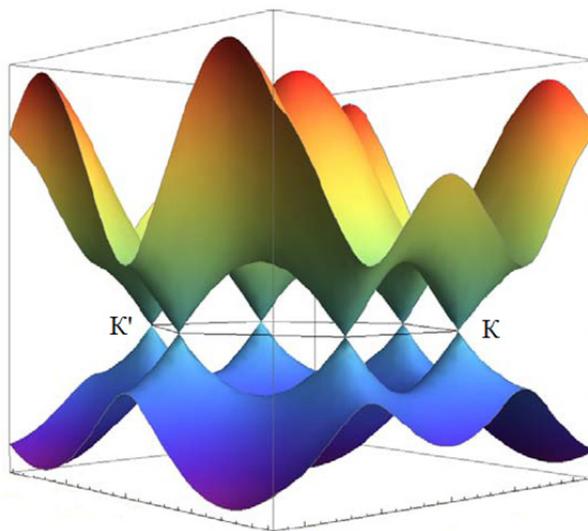


Рис. 2. Зонная структура графена с точками соприкосновения зоны проводимости и валентной зоны в точках  $K$  и  $K'$  [3]

Исходя из зонной структуры (см. рис. 2), графен – это вещество, у которого валентная зона и зона проводимости перекрываются (запрещенная зона отсутствует как в металлах), но в отличие от металлов это пересечение очень мало. Точки соприкосновения зоны проводимости и валентной зоны в графене образуют так называемые точки Дирака. В этих точках закон дисперсии квазичастиц имеет линейный вид: энергия квазичастиц прямо пропорциональна их импульсу. Подобной зависимостью энергии от импульса обладают еще и безмассовые частицы – фотоны, т.е. электроны в графене ведут себя как фотоны, имея нулевую массу и скорость движения  $vF$  порядка  $10^6$  м/с, соответствующую энергии Ферми. В графене при положительных энергиях (выше дираковской точки) токонесящие состояния подобны электронам и заряжены отрицательно [4]. При отрицательных энергиях, если валентная зона целиком не заполнена, квазичастицы ведут себя как положительно заряженные частицы (дырки) и могут рассматриваться как твердотельный аналог позитронов [5].

Нулевая масса носителей заряда графена обуславливает их исключительно высокую подвижность – параметр, характеризующий пригодность материала для применения в электронике. Согласно измерениям А. Гейма и К. Новоселова предельное значение подвижности носителей заряда в этом материале при комнатной температуре и плотности носителей  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> составляет 20 м<sup>2</sup>/В·с (для сравнения – подвижность носителей заряда в кремнии составляет 0,15 м<sup>2</sup>/В·с). При повышении температуры подвижность падает [1].

На подвижность электронов и дырок в графене существенное влияние оказывают примеси в диэлектрике подложки SiO<sub>2</sub>. Подложка кремния с диэлектриком, на котором находится графен, должна быть сильно легирована, чтобы ее можно было использовать в качестве обратного затвора [6], с помощью которого можно управлять концентрацией и даже изменять тип проводимости. Поскольку графен является полуметаллом, то приложение положительного напряжения к затвору

приводит к электронной проводимости графена, и напротив, если приложить отрицательное напряжение, то основными носителями станут дырки, поэтому в принципе нельзя обеднить полностью графен от носителей.

Высокая подвижность носителей заряда в графене делает его перспективным материалом для использования в различных приложениях, в частности, как будущую основу нанoeлектроники и возможную замену кремния в интегральных микросхемах, и способствует созданию электронных приборов и устройств ТГц и ИК диапазонов.

## 2. Математическая модель

Монослой графена характеризуется поверхностной проводимостью  $\sigma_s$ , определяемой формулой Кубо [7]:

$$\sigma_s(\omega, \mu_c) = \frac{-ie^2 k_b T}{\pi \hbar^2 (\omega - i2\Gamma)} \left( \frac{\mu_c}{k_b T} + 2 \ln \left( \exp \left( \frac{-\mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right) \right) - \frac{ie^2 (\omega - i2\Gamma)}{\pi \hbar^2} \int_0^\infty \frac{\left( \exp \left( \frac{-\xi - \mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right)^{-1} - \left( \exp \left( \frac{\xi - \mu_c}{k_b T} \right) + 1 \right)^{-1}}{(\omega - i2\Gamma)^2 - \left( \frac{2\xi}{\hbar} \right)^2} d\xi, \quad (1)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  к – заряд электрона;  $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/к – постоянная Больцмана;  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $T$  – температура;  $\Gamma$  – частота релаксации;  $\mu$  – химический потенциал;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота. Поверхностная проводимость  $\sigma_s$  графена является комплексной величиной с положительной действительной частью  $\sigma'_s$ . Мнимая часть поверхностной проводимости  $\sigma''_s$  содержит отрицательный вклад от внутризонной проводимости и положительный от межзонной.

В задачах электродинамики используется эффективная диэлектрическая проницаемость графена, в уравнения Максвелла входит объемная удельная проводимость  $\sigma$ , которую необходимо выразить через поверхностную проводимость  $\sigma_s$ . Для монослоя графена вводится комплексная диэлектрическая проницаемость [7]:

$$\varepsilon(\omega, \mu_c) = 1 + \frac{i\sigma(\omega, \mu_c)}{\varepsilon_0 \omega d}, \quad (2)$$

где  $d$  – эффективная толщина монослоя графена, а поверхностная  $\sigma_s$  и объемная  $\sigma$  проводимости связаны между собой соотношением:  $\sigma = \sigma_s / d$ .

## 3. Результаты расчета проводимости графена при различных значениях химического потенциала в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот

Расчет поверхностной проводимости графена проведен по формуле (1) для комнатной температуры  $T = 300$  К. Приняты следующие значения параметров: частота релаксации  $\Gamma = 10^{12}$  1/с, эффективная толщина слоя графена  $d = 1 \cdot 10^{-9}$  м. Диапазон изменения химического потенциала  $\mu_c = 0 - 1$  эВ.

Зависимости поверхностной проводимости  $\sigma_s$  графена от частоты в широком интервале частот от 1 ТГц до 1000 ТГц, который включает СВЧ, ТГц и ИК диапазоны, показаны на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что в диапазоне частот от 0,001 до 0,1 ТГц действительная часть  $\sigma'_s$  проводимости графена является практически постоянной величиной.

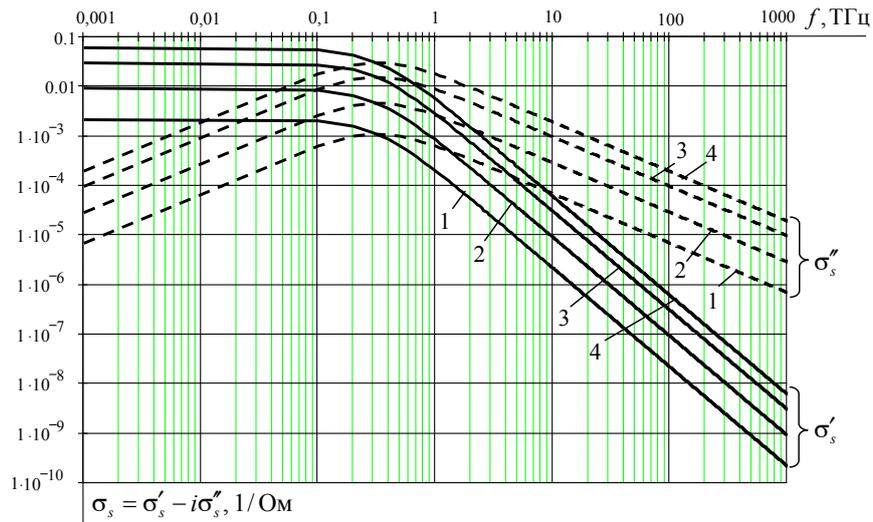


Рис. 3. Частотные зависимости действительной и мнимой частей поверхностной проводимости графена в СВЧ, ТГц и ИК диапазонах при различных значениях химического потенциала:  
 1 –  $\mu_c = 0,0\text{эВ}$ ; 2 –  $\mu_c = 0,15\text{эВ}$ ; 3 –  $\mu_c = 0,5\text{эВ}$ ; 4 –  $\mu_c = 1,0\text{эВ}$

На рис. 4 показаны расчетные зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости графена от частоты в ИК диапазоне от 200 до 1000 ТГц при различных значениях химического потенциала.

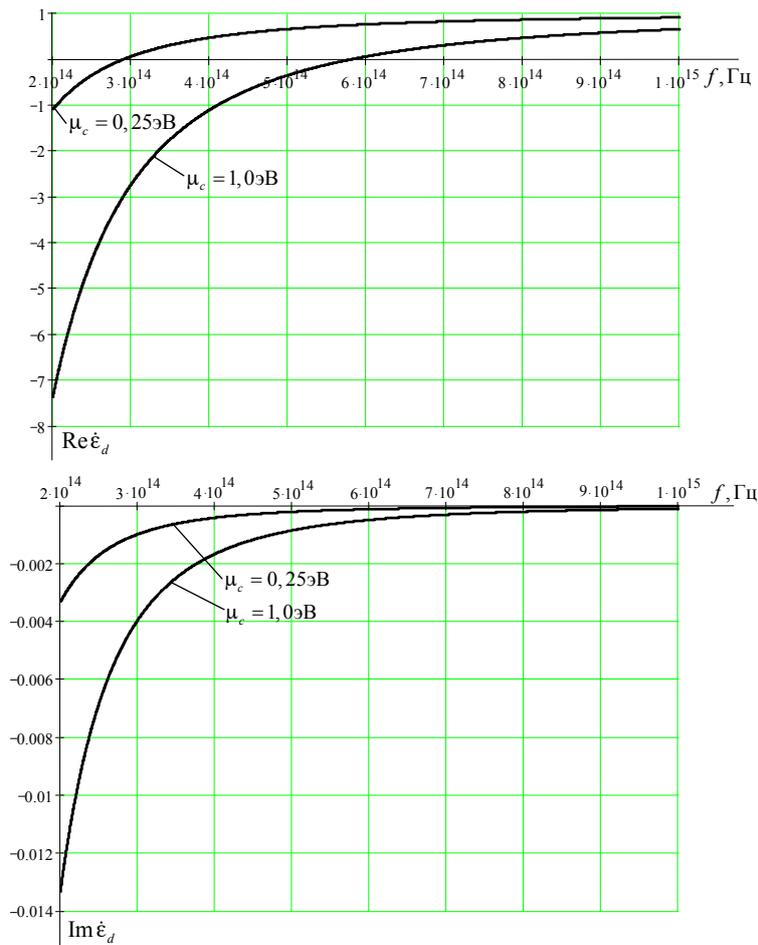


Рис. 4. Зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости графена от частоты в ИК диапазоне при различных значениях химического потенциала

Из графиков на рис. 4 следует, что при различных значениях химического потенциала действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости меняет знак с «-» на «+» и стремится к единице. При этом мнимая часть диэлектрической проницаемости знака не меняет. На частотах до 0,1 ТГц графен ведет себя как металл. Начиная с частоты 2 ТГц и выше мнимой частью диэлектрической проницаемости графена можно пренебречь.

Проводимость графена в ТГц диапазоне определяется, согласно модели (1), химическим потенциалом, который можно изменять, например, приложением внешнего электрического поля [7]. При изменении химического потенциала от 0 до 1 эВ поверхностная проводимость графена  $\sigma_s$  увеличивается почти в 20 раз (см. рис. 4). Изменение химического потенциала осуществляется составляющей вектора напряженности внешнего электрического поля  $E_0$ , нормальной к плоскости графена [8] (рис. 5). Для учета влияния зависимости химического потенциала  $\mu_c$  от внешнего электрического поля  $E_0$  на поверхностную проводимость графена, нужно соответствующую зависимость  $\mu_c(E_0)$  учесть в формуле (1).

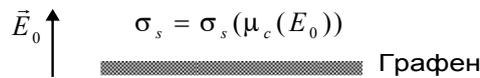


Рис. 5. Схема управления проводимостью графена при изменении химического потенциала приложенным внешним электрическим полем  $E_0$

Нормальная к плоскости графена составляющая вектора электрической индукции равна [9]:

$$D_0 = \epsilon_b \epsilon_0 E_0 = e n_s / 2, \tag{3}$$

где  $\epsilon_0 \epsilon_b$  – диэлектрическая проницаемость графена;  $n_s$  – 2D поверхностная плотность электрического заряда. Поверхностная плотность заряда  $n_s$  определяется выражением [9–11]:

$$n_s = \frac{2}{\pi \hbar^2 v_F^2} \int_0^\infty \epsilon (f_d(\epsilon) - f_d(\epsilon + 2\mu_c)) d\epsilon, \tag{4}$$

где  $f_d(\epsilon) = \left( \exp\left(\frac{\epsilon - \mu_c}{k_b T}\right) + 1 \right)^{-1}$  – функция распределения Ферми–Дирака;  $\epsilon$  – энергия электрона,

$v_F = \frac{3\gamma_0 b}{2\hbar}$ , где  $\gamma_0 = 2,7$  эВ, расстояние между соседними атомами в структуре графена  $b = 0,142$  нм.

Из (3), (4) получаем выражение, связывающее между собой напряженность внешнего электрического поля  $E_0$  и химический потенциал  $\mu_c$ :

$$E_0 = \frac{e}{\pi \hbar^2 v_F^2 \epsilon_b} \int_0^\infty \epsilon (f_d(\epsilon) - f_d(\epsilon + 2\mu_c)) d\epsilon. \tag{5}$$

Зависимость химического потенциала  $\mu_c$  от напряженности внешнего постоянного электрического поля  $E_0$ , рассчитанная по формуле (5), показана на рис. 6.

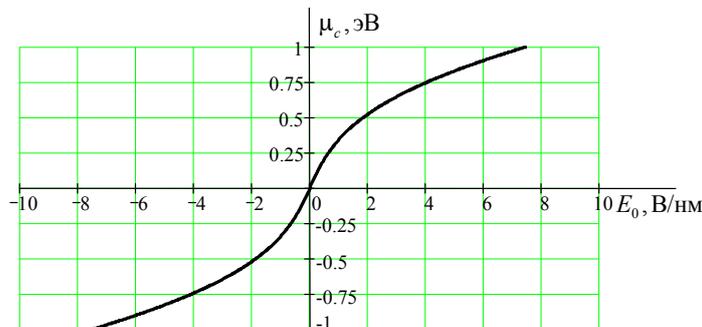


Рис. 6. Зависимость химического потенциала  $\mu_c$  от напряженности внешнего постоянного электрического поля  $E_0$

Зависимости поверхностной проводимости графена от напряженности внешнего постоянного электрического поля  $E_0$ , рассчитанные по формуле (3) с учетом (5), для различных частот ТГц диапазона приведены на рис. 7, 8.

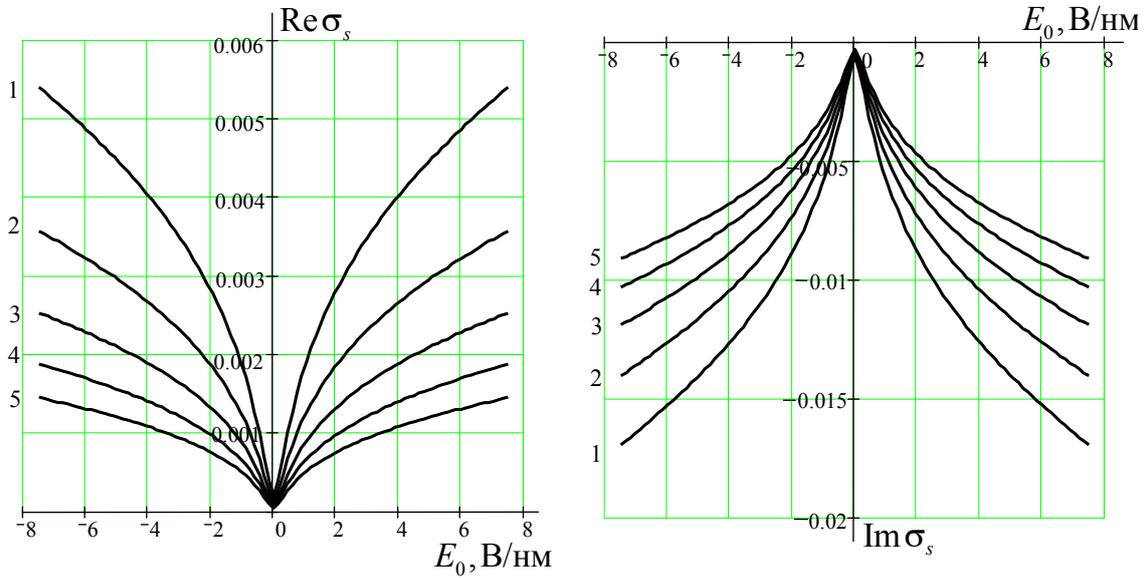


Рис. 7. Зависимость действительной и мнимой частей поверхностной проводимости графена от напряженности внешнего постоянного электрического поля  $E_0$ :  
 кривая 1 –  $f = 1$  ТГц; 2 – 1,25 ТГц; 3 – 1,5 ТГц; 4 – 1,75 ТГц; 5 – 2 ТГц

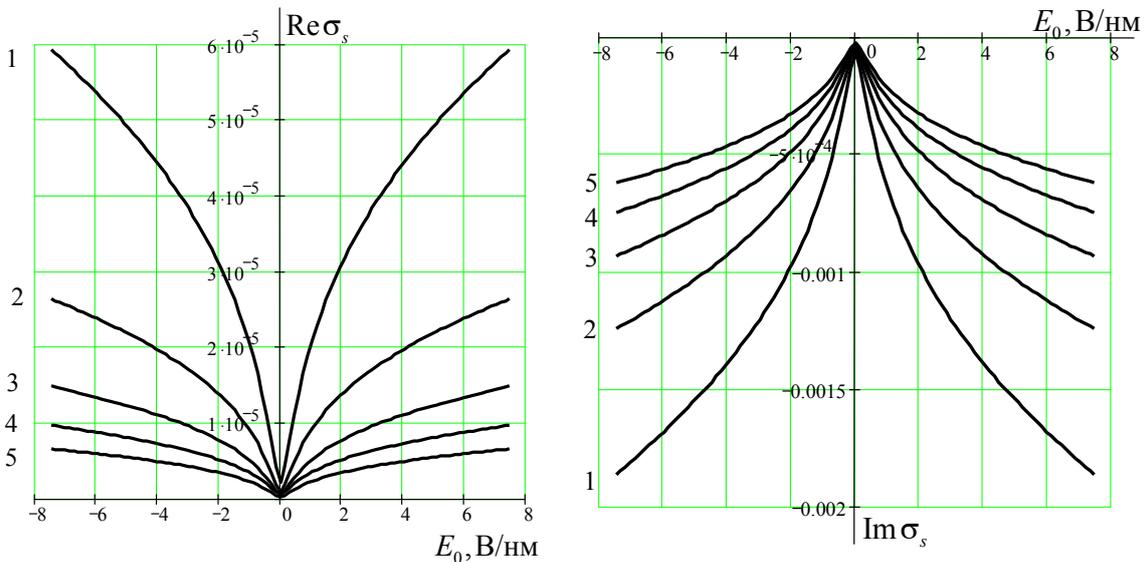


Рис. 8. Зависимость действительной и мнимой частей поверхностной проводимости графена от напряженности внешнего постоянного электрического поля  $E_0$ :  
 кривая 1 –  $f = 10$  ТГц; 2 – 15 ТГц; 3 – 20 ТГц; 4 – 25 ТГц; 5 – 30 ТГц

Зависимости являются симметричными и нелинейными, особенно сильно нелинейность проявляется вблизи точки  $E_0 = 0$ .

### Заключение

По формуле Кубо проведен расчет поверхностной проводимости монослоя графена и получены зависимости от частоты в широком интервале частот от 1 ТГц до 1000 ТГц, который вклю-

чает СВЧ, ТГц и ИК диапазоны. Показано, что на частотах до 0,1 ТГц графен ведет себя как металл, начиная с частоты 2 ТГц и выше мнимой частью диэлектрической проницаемости графена можно пренебречь.

Полученные в работе результаты демонстрируют, что управлять проводимостью графена можно путем изменения значений химического потенциала. При изменении химического потенциала от 0,0 до 1,0 эВ поверхностная проводимость графена увеличивается примерно в 20 раз.

### Список литературы

1. Юдинцев, В. Графен. Нанoeлектроника стремительно набирает силы / В. Юдинцев // Электроника НТБ. – 2009. – URL: <http://www.electronics.ru/issue/2009/6/16>
2. Чиркина, М. А. Математическое моделирование устройств сверхвысоких частот на магнитных наноконструкциях / М. А. Чиркина, Н. К. Юрков, А. Н. Якимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 167–173.
3. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010 : Graphene / The Royal Swedish Academy of Sciences. – Stockholm, Sweden, 2010. – URL: <http://kva.se>
4. Морозов, С. В. Электронный транспорт в графене / С. В. Морозов, К. С. Новоселов, А. К. Гейм // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 7. – С. 776–780.
5. Москалюк, В. А. Перспективные наноструктуры и наноконструктивные компоненты электроники / В. А. Москалюк, В. И. Тимофеев // Электроника и связь. – 2000. – № 2(55). – С. 14–27. – (Электроника и нанотехнологии).
6. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov et al. // Science. – 2004. – P. 306–310.
7. Hanson, G. W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene / G. W. Hanson // J. of Appl. Phys. – 2008. – V. 103. – P. 064302.
8. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene / K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H. L. Stormer // Solid State Commun. – 2008. – V. 146. – P. 351–355.
9. Ryzhii, V. Plasma waves in two-dimensional electron-hole system in gated graphene heterostructures / V. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji // J. Appl. Phys. – 2007. – V. 101. – P. 024509 (1-5).
10. Falkovsky, L. A. Unusual field and temperature dependence of the Hall effect in graphene / L. A. Falkovsky // Phys. Rev. B. – 2007. – V. 75. – P. 033409 (1-4).
11. Электродинамический расчет порогов нелинейности анизотропных наноструктурных материалов по точкам бифуркации нелинейного оператора Максвелла / Г. С. Макеева, О. А. Голованов, Д. Н. Ширшиков, Г. Г. Горлов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 58–64.
12. Excitation of Plasmonic Waves in Graphene by Guided-Mode Resonances / W. Gao, J. Shu, C. Qiu, Q. Xu // ACS Nano. – 2012. – № 6 (9). – P. 7806–7813.

#### **Голованов Олег Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
кафедра общеобразовательных дисциплин,  
Пензенский филиал Военной академии  
материально-технического обеспечения  
(440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5)  
E-mail: [golovanovol@mail.ru](mailto:golovanovol@mail.ru)

#### **Макеева Галина Степановна**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [radiotech@pnzgu.ru](mailto:radiotech@pnzgu.ru)

#### **Вареница Виталий Викторович**

директор департамента аудита кода и сертификации,  
ЗАО «НПО «Эшелон»  
(107023, Россия, г. Москва, ул. Электрозаводская, д. 24)  
8-(495)-223-23-92  
E-mail: [v.varenitsa@cnpo.ru](mailto:v.varenitsa@cnpo.ru)

**Аннотация.** Проведен расчет поверхностной проводимости монослоя графена, определяемой форму-

#### **Golovanov Oleg Aleksandrovich**

doctor of physical and mathematical sciences, professor,  
sub-department of general subjects,  
Penza branch of Military academy of logistics  
(440005, Penza, Russia)

#### **Makeeva Galina Stepanovna**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of radio-engineering  
and electronic systems,  
Penza State University,  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### **Varenitca Vitalyi Viktorjvich**

manager of department of enterprise «Eshelon»  
(107023, 24 Elektro zavodskaj street, Moscow, Russia)

**Abstract.** The calculation of surface conductivity of graphene monolayer determined from the Kubo formula

лой Кубо, в модели, учитывающей внутри- и межзонную проводимости и комплексной диэлектрической проницаемости графена от частоты. Исследовано влияние на проводимость графена изменения химического потенциала при приложении внешнего электрического поля в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот; при этом его поверхностная проводимость увеличивается в десятки раз.

**Ключевые слова:** поверхностная проводимость, комплексная диэлектрическая проницаемость, монослой графена, формула Кубо, терагерцовый, инфракрасный диапазон.

taking into account in the model the intraband and interband conductivities is performed depending on the frequency. The influence on the conductivity of the Graphene changes the chemical potential upon the application of an external electric field in terahertz and infrared frequencies; the surface conductivity increases tenfold.

**Key words:** surface conductivity, complex permeability, graphene monolayer, Kubo formula, terahertz, infrared frequency range.

**УДК 537.874.6**

**Голованов, О. А.**

**Проводимость графена в терагерцовом и инфракрасном диапазонах частот / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, В. В. Вареница // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 26–33.**

# НАДЕЖНОСТЬ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.3.019

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Б. Ж. Куатов

Развитие мировой авиации сопровождается проявлением ряда факторов, меняющих взгляды на роль и место тренажерных систем в профессиональной подготовке авиационных специалистов, на их применение и облик. На современном этапе развития авиации эти факторы можно условно разделить на три группы – экономические, технические и научные.

Группа экономических факторов является базисной и определяет целесообразность выполнения тех или иных работ. Прогресс в авиации сопровождается возрастанием ряда стоимостных показателей.

Группа технических факторов определяется современным состоянием самолетного и тренажерного парка, а также политикой развития авиации, авиационной техники и системы профессиональной подготовки авиационных специалистов.

Группа научных факторов является следствием последних мировых достижений в развитии тренажерных технологий авиационного назначения.

В итоге крайне актуальной становится задача оптимизации денежных расходов как в сфере авиационной промышленности в целом, так и в области профессиональной подготовки авиационных специалистов. Общепризнанным направлением ее решения, в том числе и в мировой практике, является внедрение в систему подготовки и обучения летного состава высокоэффективных малозатратных тренажерных систем нового поколения.

Современный уровень развития компьютерной техники, информационных технологий и методологии дистанционного обучения в ряде случаев позволяет моделировать человека как элемента авиационной системы, исследовать его свойства и обеспечить автоматизированное освоение такой системы для повышения ее эффективности функционирования в целом. Проблеме обеспечения высокой боевой готовности войск ВВС и их эффективного использования при решении поставленных задач всегда уделяется большое внимание.

Совершенствование и усложнение военной техники, непрерывное увеличение объема и сложности решаемых боевых задач, повышение требований к военно-специальной подготовке личного состава и требований безопасности полетов привели к возрастанию роли программно-технических средств, к необходимости их дальнейшего совершенствования в системе профессиональной подготовки личного состава ВВС. Одним из классов программно-технических средств (ПТС) практической подготовки личного состава ВВС являются тренажеры (рис. 1).

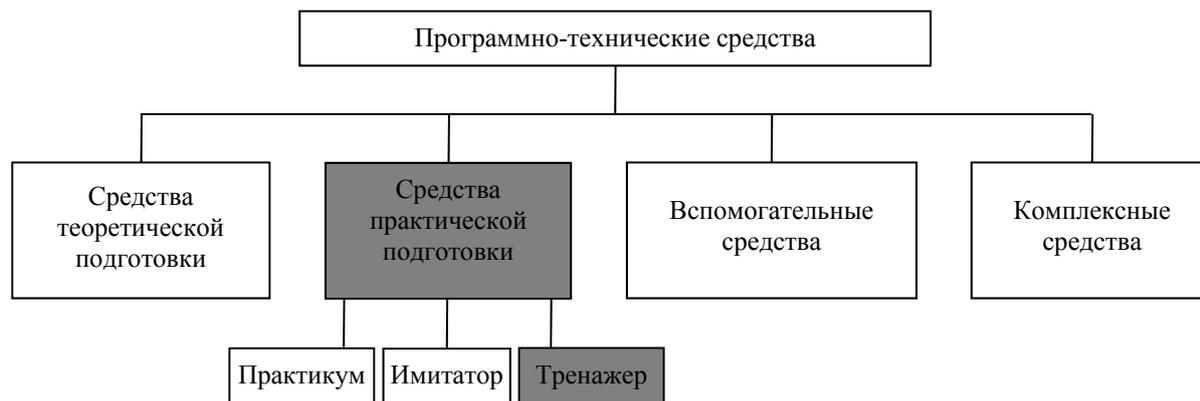


Рис. 1. Классификация программно-технических средств

Как известно, процесс формирования умений весьма длителен и требует больших затрат учебного времени, материальных средств и расхода ресурса техники. Кроме того, создать в процессе освоения реальные условия деятельности специалистов по эксплуатации и применению военно-технических систем не всегда возможно. Все это потребовало разработки и внедрения ПТС, в которых моделируются реальные условия работы объектов (техники) в процессе тренировки.

Тренажеры обеспечивают возможность более наглядно и доходчиво представлять информацию для специалиста, позволяют руководителю занятий осуществлять контроль за их деятельностью в ходе тренировок, своевременно выявлять допускаемые ими ошибки и их причины, одновременно готовить большее количество специалистов, чем на реальной технике. Роль тренажеров постоянно возрастает в связи с повышением стоимости и сложности техники и вооружения, актуальностью проблем безопасности, необходимости экономии ресурсов техники и охраны окружающей среды. Кроме того, на реальной технике не всегда доступно проводить тренировки по изучению устройства и работы отдельных элементов, показывать правильные действия при боевом применении, устранении возникающих неисправностей, а также при техническом обслуживании. Немаловажным фактом является то, что тренажеры позволяют проводить тренировки без выезда на полигоны. Кроме того, анализ существующих ПТС военно-специальной подготовки показывает, что только тренажеры позволяют форсировать процесс получения умений, а также достаточно объективно контролировать уровень подготовки специалистов.

Роль и место технических средств подготовки и обучения авиационных специалистов (ТСПО АС) следует рассматривать, прежде всего, с позиций их дидактических возможностей [1].

Дидактические возможности ТСПО (рис. 2) определяются совокупностью методологических параметров, характеризующих их совершенство как средства профессиональной подготовки авиационных специалистов. К таковым относятся: дидактическая направленность (рис. 2,а); дидактическая роль (рис. 2,б); дидактический статус (рис. 2,в); дидактическое место (рис. 2,г).

Дидактическая направленность характеризует сферы профессиональной деятельности авиационных специалистов, где предполагается применение ТСПО. Дидактическая роль определяется классом дидактических задач, решаемых с применением ТСПО. Дидактический статус определяет соотношение педагогических систем летательного аппарата и его ТСПО в общей системе подготовки авиационных специалистов. Дидактическое место определяет значение ТСПО АС на различных этапах подготовки.

Для обеспечения эффективного функционирования ТСПО в ходе решения дидактических задач самого разного класса на различных этапах профессионального становления всех категорий авиационных специалистов их дидактическая система предполагает применение комплекса дидактических методов и соответствующих им форм:

- наглядно-образный метод обучения;
- метод тестирования;
- репродуктивные методы формирования знаний, навыков и умений;
- метод ситуационной подготовки.

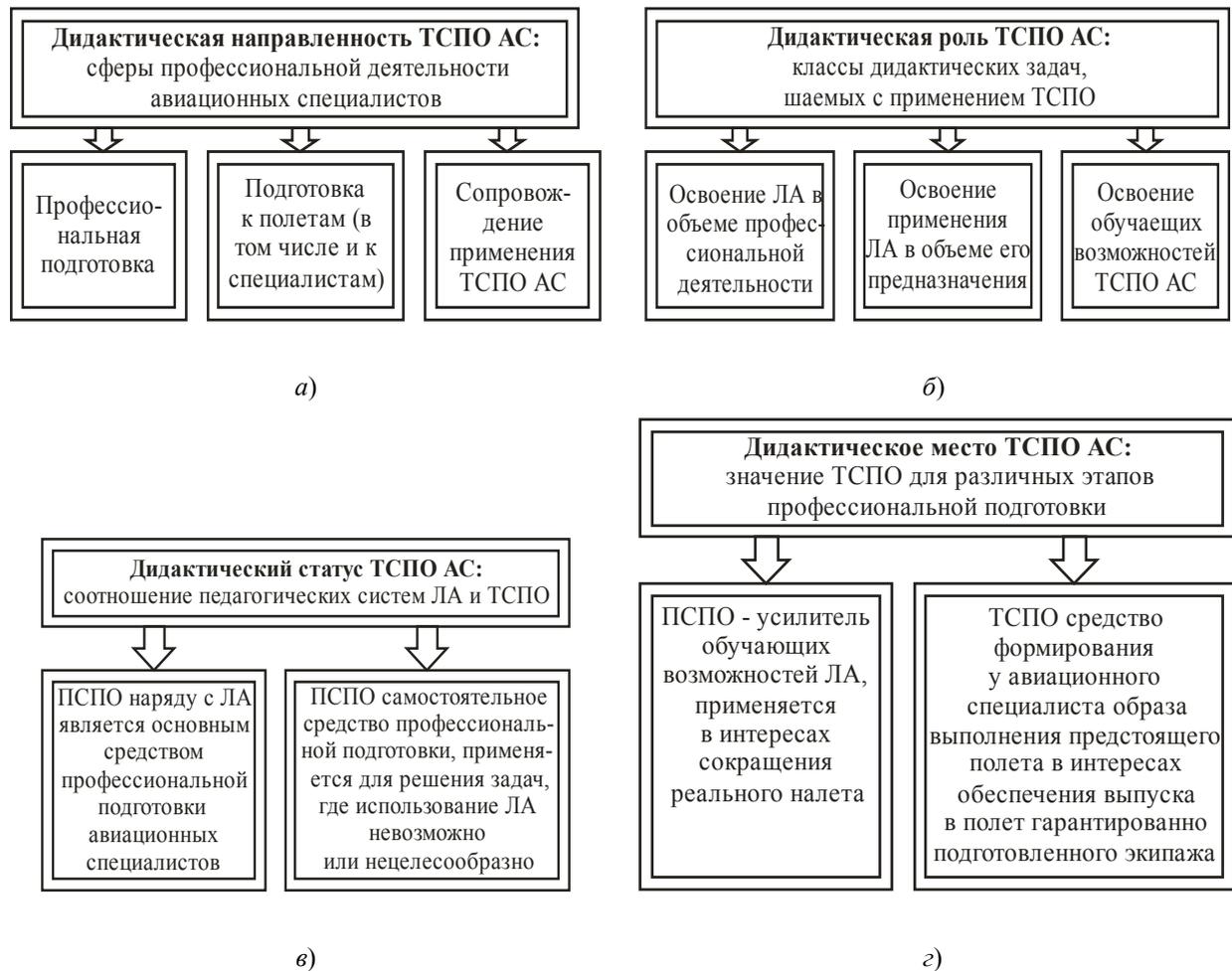


Рис. 2. Дидактические возможности ТСПО АС:  
а – дидактическая направленность; б – дидактическая роль;  
в – дидактический статус; г – дидактическое место

Наглядно-образный метод обучения основан в основном на формировании знаний, навыков и умений через демонстрацию правильного (эталонного) решения обрабатываемых задач. Данный метод целесообразно использовать на этапе теоретического обучения, а также при разборе результатов тренировки. Реализация данного метода возможна в следующих формах: компьютерная демонстрация на выносном рабочем месте летчика и рабочем месте инструктора с использованием монитора; демонстрация на рабочем месте обучаемого с применением моделируемого оборудования летательного аппарата (ЛА); демонстрация на экране коллективного пользования.

Метод тестирования предполагает формирование знаний, навыков и умений обучаемого через выполнение тестовых заданий различного уровня сложности. Кроме этого, различного рода тесты применяются для входного, текущего и итогового контроля при оценке результатов упражнений и тренировок. Реализация данного метода возможна в следующих формах: тесты, выполняемые в кабине тренажера с использованием моделируемого оборудования ЛА.

Метод репродуктивного обучения является основным на начальных этапах профессионального становления авиационных специалистов. Его реализация возможна в следующих формах: индивидуальные и групповые упражнения, обеспечивающие формирование навыков и умений при выполнении типовых элементов профессиональной деятельности; индивидуальные и групповые тренировки, обеспечивающие восстановление; поддержание на заданном уровне и совершенствование сформированных в процессе упражнений знаний, навыков и умений.

Метод ситуационной подготовки основан на создании на тренажере обстановки, соответствующей предстоящему полетному заданию. Экспериментально установлено, что в памяти человека запечатлевается до 90 % того, что он делает, 50 % того, что он видит, и только 10 % того, что он слышит. Выполняя полетное задание на тренажере, обучаемый погружается в сложившуюся

реальную ситуацию, что позволяет более качественно сформировать образ выполнения предстоящего полета. Данный метод предполагает также отработку тактических, а также нештатных ситуаций, которые могут возникнуть в полете.

Реализация ситуационного метода обучения возможна в следующих формах: индивидуальное упражнение-игра; индивидуальная игра с компьютерным ролевым подыгрышем; групповая ролевая игра с компьютерным ролевым подыгрышем; групповая ролевая игра.

Необходимо отметить, что данные методы и формы подготовки дидактически надежны, что подтверждено опытом их применения в практике тренажерной подготовки, как в нашей стране, так и за рубежом.

Одновременно с разработкой авиационных тренажеров развивались и теоретические основы их применения. Как показали проведенные исследования, в их развитии можно выделить четыре основных этапа, ограниченных следующими историческими рамками (рис. 3): эмпирический этап (до середины 20-х гг.); этап зарождения научно-педагогических основ тренажерной подготовки (с середины 20-х до середины 30-х гг.); этап развития в рамках различных научных дисциплин (с середины 30-х гг. по настоящее время); этап становления как самостоятельной научной и учебной дисциплины.

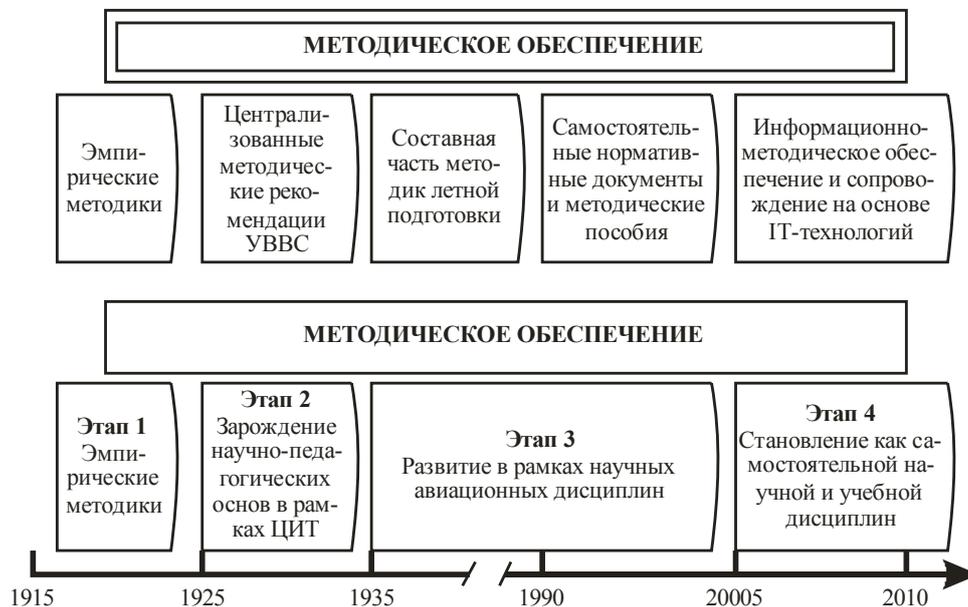


Рис. 3. Генезис тренажерной подготовки

За прошедшие десятилетия накоплен достаточно большой опыт применения авиационных тренажеров в различных сферах летного обучения. Необходимо отметить, что оценке этого опыта, а также анализу проблем тренажерной подготовки (ТП) посвящено достаточно много работ.

Вместе с тем, на наш взгляд, современный этап развития авиационной науки характеризуется необходимостью формирования тренажерной подготовки как относительно самостоятельного научного феномена. Данное обстоятельство обусловлено совокупностью факторов технического, экономического и научного характера. В качестве основных можно выделить следующие [2].

Во-первых, изменение характера летного труда, вызванное развитием авиационной техники и тактики ее применения, обуславливает изменение содержания тренажерной подготовки. Такая картина должна найти отражение и в практике тренажерной подготовки, что требует наличия соответствующей теоретической базы.

Во-вторых, развитие авиационной техники сопровождается существенным ростом ряда стоимостных показателей. Крайне актуальной становится задача оптимизации ресурсного обеспечения, в том числе и финансового, как в области авиационной промышленности в целом, так и в области профессиональной подготовки экипажей. Общеизвестным направлением решения этой задачи считается внедрение в систему летной подготовки тренажерных систем нового поколения. Новизна этой проблемы требует создания теоретической базы, соответствующей интеллектуальному уровню современных и перспективных образцов авиационной и тренажерной техники.

В-третьих, благодаря развитию авиационного тренажеростроения как в научном, так и в технологическом плане в настоящее время создаются тренажерные системы нового поколения. Проведенный анализ показывает, что в методологическом плане они наряду с летательными аппаратами могут считаться основным средством профессиональной подготовки летного состава, выполняющим функции связующего звена в деятельности экипажа на земле и в воздухе. При этом каждый элемент перед тренировкой в воздухе может отрабатываться на земле в условиях, соответствующих предстоящему полету. Данный класс авиационных тренажеров может применяться при обучении летчиков на всех этапах их профессионального становления. Однако данные разработки не сопровождаются соответствующими теоретическими исследованиями в сфере профессиональной подготовки экипажей.

В-четвертых, в настоящее время в различных отраслях педагогики появилось большое число разработок, посвященных различным аспектам профессионализации на основе новейших достижений в области информатики и IT-технологий. К таковым можно отнести исследования по педагогической информатике, виртуальной педагогике, электронной педагогике и др. Эти разработки нуждаются в теоретическом осмыслении в интересах использования в практике тренажерной подготовки летного состава.

Структура тренажерной подготовки как научного феномена и ее место в системе научного знания показаны на рис. 4.

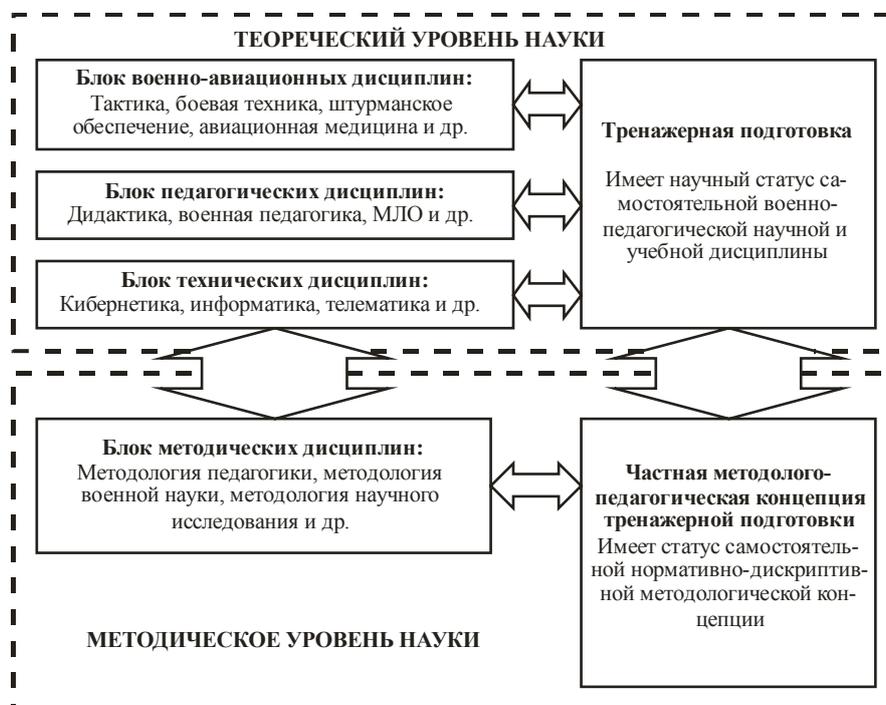


Рис. 4. Научный и методологический статус тренажерной подготовки

Тренажерную подготовку следует рассматривать как область научного знания, лежащую на стыке военных авиационных дисциплин (тактика, боевая подготовка, штурманское обеспечение, авиационная медицина и др.), педагогических дисциплин (дидактика, военная педагогика, методика летного обучения и др.) и технических дисциплин (кибернетика, информатика и др.).

Ее структура определяется следующими факторами: сложностью объекта исследования, лежащего на стыке научных дисциплин военной, технической и педагогической сферы; слабой формализуемостью профессиональной подготовки экипажей, обусловленной педагогической природой протекаемых процессов; существенное усложнение педагогической деятельности обучающего персонала, обусловленное прогрессом авиационной и тренажерной техники; новизна постановки проблемы, обусловленная отсутствием подобных теоретических разработок как в нашей стране, так и за рубежом. Указанные факторы обуславливают необходимость разработки частной методолого-педагогической концепции тренажерной подготовки, имеющей нормативно-

deskриптивный статус. При этом нормативные функции обеспечат корректную постановку проблемы, что послужит средством их решения (интеллектуальная техника научной деятельности), а deskриптивные функции обеспечат научное познание объекта исследования со стороны его методов, понятийно-категориального аппарата, а также характерных схем объяснения.

Важнейшим условием эффективного применения ТСПО АС в практике профессиональной подготовки авиационных специалистов является наличие методического и дидактического обеспечения, отвечающего интеллектуальному уровню развития современных тренажерных технологий [3].

Современная система тренажерной подготовки (ТП) подвержена собственным конфликтам, возникающим из-за сложившейся специфики ее организации, особенностей функционирования реальной техники и применения средств тренажа. В [4, 5], наверно, впервые определено понятие «конфликт» в тренажерной подготовке операторов: «наряду с несомненным достоинством тренажеров для них присущ один из недостатков, выраженный в наличии противоречия (конфликта) между оценками уровней навыков  $w_S$  и  $w$  операторов, определенными на конкретном тренажере и штатной технике

$$(w \neq w_S) \Rightarrow (wRw_S) = R(w),$$

где  $R$  – конфликт,  $\Rightarrow$  – оператор следования».

Организационно ТП регламентируется учебными упражнениями и учебными планами Курсов учебно-летней подготовки (КУЛП), которые имеют плано-предупредительный характер и определяются эмпирически в ходе специальных исследовательских учений с привлечением экспертов, обладающих опытом летной работы. Эпизодическая коррекция КУЛП осуществляется на основании организационно-методических указаний (ОМУ), формирующихся по результатам боевого применения на войсковых учениях, проведение которых в современных условиях затруднительно, что способствует моральному устареванию учебных упражнений, выраженного в снижении их полезности и заключающегося в наличии противоречия между предписанными и альтернативными содержательными компонентами учебных упражнений, отражающих, соответственно, принятые и действительные функционирования и операции применения летательных аппаратов (ЛА) [6].

Кроме того, наложение ряда экономических и организационно-технических ограничений не позволяет обеспечить реализацию КУЛП летным составом на штатной технике в полном объеме, что приводит к обострению конфликта применения ЛА. Однако из-за ограниченной адекватности тренажеров по отношению к штатной технике возникает конфликт применения тренажеров, заключающийся в противоречии между оценками уровней навыков, получаемыми летным составом (ЛС) при отработке единых учебных упражнений на тренажерах и штатной технике, что приводит к формированию некорректных содержательных компонентов учебных планов, отражающих количество тренировок на средствах тренажа.

В существующем виде представления КУЛП слабо отражают широкий спектр индивидуальных особенностей летного состава, что не позволяет обеспечить дифференцированный подход обучения. Разрешение этой проблемы вполне возможно за счет преломления современных методологических основ автоматизации ТП. Это позволит осуществлять адаптацию к уровню подготовки ЛС не только учебных упражнений и планов, но и типовых ситуаций на средствах тренажа. Несомненно автоматизация ТП позволит повысить оперативность индивидуальной корректировки учебного процесса, снизить экономические затраты и уменьшить субъективные ошибки, свойственные инструкторам [7, 8].

Развитие и преломление применительно к ТП научных основ теории конфликта, разработанных научной школой профессора В. В. Сысоева, позволяет акцентировать внимание на возможности существования совокупности конфликтов, вредно влияющих на полезность применения ЛА, от которых, безусловно, необходима защита. Разрешение конфликта заключается в «правильности» использования технических средств в общей системе тренажерной подготовки летного состава [9].

### Список литературы

1. Бодрунов, С. Д. Концепция развития и совершенствования технических средств подготовки и обучения авиационных специалистов / С. Д. Бодрунов // Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи : сб. ст. Междунар. конф. – М. : ЦАГИ, 2003. – С. 16–27.

2. Зубов, Н. П. Применение тренажерных систем, реализующих активные методы профессиональной подготовки: проблемы и пути их решения / Н. П. Зубов, Н. О. Кобельков // Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи : сб. ст. Междунар. конф. – М. : ЦАГИ, 2003. – С. 115–124.
3. Солдатенков, О. Ф. Перспективные технологии разработки и сопровождения авиационных тренажеров (АТ) / О. Ф. Солдатенков // Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи : сб. ст. Междунар. конф. – М. : ЦАГИ, 2003. – С. 40–43.
4. Дикарев, В. А. Автоматизация тренажерной подготовки операторов радиоэлектронных объектов / В. А. Дикарев ; под общ. науч. ред. В. В. Сысоева. – М. : ИПРЖР, 2002. – 168 с.
5. Дикарев, В. А. Обеспечение качества применения компьютерных систем тренажа / В. А. Дикарев, А. Н. Потапов, Р. Р. Султанов ; под общ. науч. ред. В. В. Сысоева. – Балашов : Николаев, 2002. – 88 с.
6. Сысоев, В. В. Конфликт. Сотрудничество. Независимость. Системное взаимодействие в структурно-параметрическом представлении : моногр. / В. В. Сысоев. – М. : МАЭП, 1999. – 151 с.
7. Годунов, А. И. Обеспечение комплексной адекватности авиационных тренажеров / А. И. Годунов, Б. К. Кемалов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 15–24.
8. Затылкин, А. В. Синтез системы управления интеллектуальной компьютерной обучающей системой / А. В. Затылкин, Б. К. Кемалов, Н. К. Юрков // Новые промышленные технологии. – 2011. – № 2. – С. 58–61.
9. Годунов, А. И. Синтез автоматизированной системы оценивания качества пилотирования на авиационном тренажере / А. И. Годунов, Ю. Г. Квятковский, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 58–64.

**Куатов Бауржан Жолдыбаевич**

заместитель начальника по учебной и научной работам,  
Военный институт Сил воздушной обороны  
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова  
(463024, Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)  
8-(713)-270-37-82  
E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru

**Аннотация.** Проведен анализ научно-методологических основ тренажерной подготовки авиационных специалистов. Рассматриваются роль и место высокоэффективных малозатратных тренажерных систем в подготовке и обучении авиационных специалистов с позиций их дидактических возможностей. В работе предлагается применение комплекса дидактических методов и соответствующих им форм в обучении и подготовке летного состава в соответствии с упражнениями и учебными планами Курсов учебно-летной подготовки.

**Ключевые слова:** тренажерная подготовка, авиационные тренажеры, технические средства подготовки и обучения авиационных специалистов, курс учебно-летной подготовки.

**Kuatov Baurzhan Zholdybaevich**

deputy chief of academic and scientific works,  
Military Institute of Air Defense Forces  
of the Republic of Kazakhstan  
named after T. Ya. Begel'dinova  
(463024, 16 A. Moldagulova avenue,  
Aktobe, Kazakhstan)

**Abstract.** The analysis of scientific and methodological foundations of the simulator training of aviation professionals was carried out. This paper examines the role and place of high-performance low-cost training systems in preparation and training of aviation staff, from the standpoint of their didactic possibilities. The paper proposes the use of complex teaching methods and their corresponding forms in the education and training of flight staff in accordance with the exercises and course curriculum of teaching and flight training.

**Key words:** simulator training, flight simulators, training devices in aviation staff training, the course of teaching and flight training.

УДК 621.3.019

**Куатов, Б. Ж.**

**Системный подход к организации тренажерной подготовки летного состава в современных условиях / Б. Ж. Куатов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 34–40.**

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

А. И. Годунов, А. В. Лобачев

### *Введение*

Одним из перспективных направлений выбора управленческих решений при функционировании АСУ в условиях неопределенности подготовки и ведения оперативных действий является обеспечение их гибкости в зависимости от условий изменения внешних и внутренних свойств, исходя из максимальной эффективности применения систем. Такие «гибкие» решения, реализуемые в самой системе и ее компонентах, являются адаптивными алгоритмами управления.

### *Анализ применимости алгоритмов управления*

Выбор рациональных решений по автоматизированной системе управления с адаптивными компонентами предусматривает анализ неопределенных условий применения и, в первую очередь, условий первой группы, определение возможных путей их компенсации, сравнение эффективности рассматриваемых путей и выбор рациональных с последующей их реализацией.

Для системы обслуживания объектов, которой является перспективная АСУ, в общем случае в качестве неопределенных условий первой группы могут быть:

- число объектов и их типы;
- расположение их относительно друг друга и относительно системы обслуживания;
- параметры движения подвижных объектов;
- восприимчивости объектов к обслуживанию;
- индикационные признаки объектов;
- характеристики средств активной реакции (САР) и др.

Кроме того, в ходе функционирования автоматизированной системы управления неопределенными являются число функционирующих компонентов системы каждого типа на каждом этапе, число и тип функционирующих объектов обслуживания, результаты обслуживания и т.д.

Эта группа параметров характеризует неопределенность исходов, которые могут быть реализованы в ходе функционирования с некоторой вероятностью. В то же время на каждом из этапов функционирования указанные параметры будут принимать вполне конкретные значения.

Оценка эффективности адаптивных возможностей АСУ предусматривает анализ диапазона неопределенности указанных факторов и возможности получения информации о них на этапе функционирования системы. Для получения информации могут использоваться как внешние, так и специальные средства компонентов системы. Внешние средства могут дать априорную информацию о типе объектов, числе и классах составных компонентов объекта, координатах, параметрах движения и режиме функционирования. Эта информация может использоваться также в качестве косвенных данных для уточнения других неопределенных факторов.

С помощью специальных средств (сенсоров) могут уточняться координаты объектов, их класс, параметры движения, а также определяться конкретные исходы в процессе обслуживания (число и взаимное положение средств, результаты обслуживания и др.). Эта информация определяет выбор рационального варианта использования системы на всех этапах функционирования.

Схема функционирования адаптивной АСУ приведена на рис. 1.

В зависимости от информации (внешней  $J_{вн}$ , поступающей, например, от обеспечивающего звена системы; или автономной  $J_a$ , получаемой с помощью собственных средств) выбирается тот или иной вариант действий, реализующий наиболее рациональную совокупность параметров  $\{\alpha\}$ . Адаптивные возможности систем реализуются исходя из принципа максимальной свободы выбо-

ра рациональных вариантов действий на каждом этапе функционирования с учетом информации об условиях и предыстории процесса.

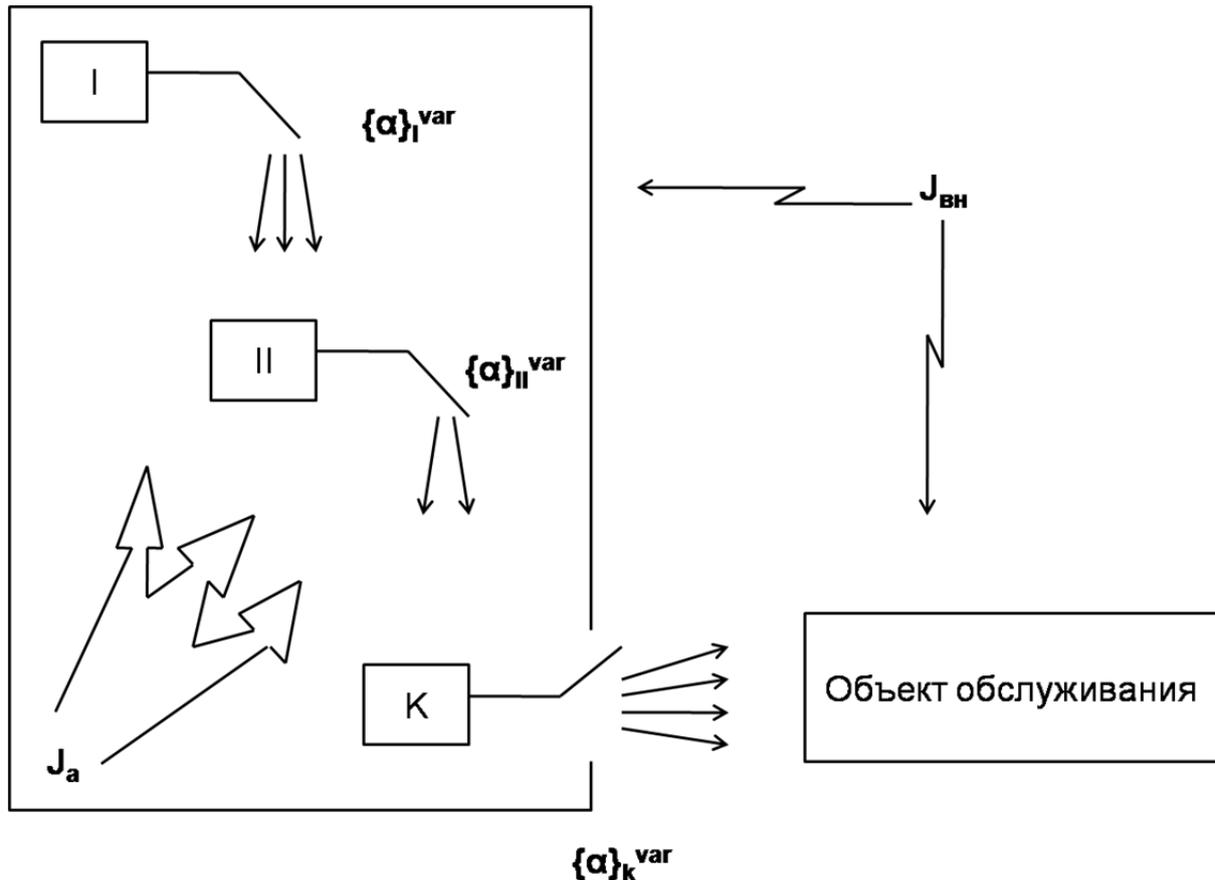


Рис. 1. Схема функционирования адаптивной АСУ

Возможные пути компенсации неопределенности зависят от используемой информации, от типа изменяемых параметров и т.д. [1, 2].

Компенсация неопределенности связана, как правило, с изменением параметров в ходе функционирования системы за счет перераспределения располагаемых ресурсов или за счет других возможностей, предусмотренных в конструкции компонентов систем.

Компенсация неопределенности может быть автономной, если она выполняется от собственных средств, командной, если она выполняется по командам от других средств системы, или комбинированной, выполняемой по совокупности информационных данных. Последний случай является более предпочтительным, так как позволяет учесть ряд непредвиденных обстоятельств, не введенных в алгоритмы автономной компенсации.

Общим случаем параметрической компенсации является обеспечение «гибкости» системы, уточнение информации в ходе функционирования, решение задачи оценки эффективности системы, с последующим выбором наиболее выгодных вариантов применения.

В качестве возможных направлений компенсации неопределенности можно назвать разработку и создание набора вариантов систем, реализацию «гибких» решений (адаптивных возможностей), оптимальные стратегии использования систем. Создание набора вариантов систем, каждый из которых является рациональным в определенных условиях, связано со значительными затратами ресурсов и сроками создания. Вместе с тем набор вариантов комплектования систем разнотипными компонентами может использоваться как один из путей конструкторской компенсации неопределенности при реализации адаптивно-модульных схем (АМС). Оптимальные стратегии использования связаны с реализацией «гибких» алгоритмов, которые также могут быть обеспечены в первую очередь соответствующими техническими решениями [3, 4].

Наиболее важным направлением компенсации неопределенности является реализация «гибких» решений. К этому направлению можно отнести следующие основные пути обеспечения адаптации:

- разработку АМС;
- регулирование параметров компонентов систем;
- перераспределение расходуемых ресурсов;
- перераспределение функций между компонентами системы;
- использование многорежимных составных компонентов;
- реализацию изменяемых конструктивных схем;
- учет конкретных реализаций случайных факторов на этапах функционирования системы;
- использование располагаемых предельных возможностей.

АМС предусматривают параллельную разработку отдельных элементов в нескольких вариантах (модулях), каждый из которых является наиболее рациональным для определенных условий применения. Это позволяет менять один из вариантов на другой в зависимости от конкретных условий, уточняющихся при функционировании АСУ.

АМС обеспечивают рациональные параметры системе для различных условий, но в некоторых случаях могут оказаться неоправданно дорогими. Поэтому такие решения используются для элементов и параметров системы, вариация которыми с помощью других решений сложно реализуема. В качестве примера АМС могут рассматриваться [5, 6]:

- приборы разведки различного типа с различными характеристиками и возможностью комплектования типовых средств разведки различным соотношением модулей;
- взаимозаменяемые варианты целевого оборудования или его компонентов, решающие различные задачи обслуживания объектов;
- сменные или комплексируемые каналы системы управления, другие вспомогательные средства, обеспечивающие функционирование АСУ.

Такой набор взаимозаменяемых модулей позволяет наиболее целесообразно формировать состав компонентов и системы в целом, рационально распределять между ними выполняемые функции и обеспечивать системе новый системный эффект в зависимости от конкретных условий.

Характеристикой исходного состояния многомодульных систем с разнотипными компонентами является вектор  $\{\chi\} = \{\chi_1, \dots, \chi_i, \dots, \chi_k\}$ , где  $\chi_i$  – доля ресурса (габаритного или массового)  $R_\Sigma$ , выделенного для размещения  $i$ -го модуля. Тогда число компонентов  $i$ -го типа может быть определено зависимостью [7]:

$$N_i = \chi_i k_i R_\Sigma + \Delta N_i; \quad N_i \in [\Delta N_i; k_i R_\Sigma]; \quad \sum_{i=1}^k \chi_i \leq 1, \quad (1)$$

где  $k_i$  – число компонентов  $i$ -го типа, приходящееся на единицу ресурса  $R_\Sigma$ ;  $\Delta N_i$  – дополнительное число компонентов  $i$ -го типа, которое может быть размещено в системе без затрат ресурса  $R_\Sigma$  (например, когда другие типы компонентов не размещаются исходя из геометрических ограничений).

Основным параметром, отражающим адаптацию такого вида, является периодически изменяемый вектор  $\{\chi\}$ , составляющие которого могут принимать дискретные значения в диапазоне  $[0; 1]$ .

Регулирование параметров предусматривает возможность изменения наиболее важных характеристик компонентов системы в некотором, заранее расширенном диапазоне и обеспечивает тем самым универсальность системы для диапазона условий применения.

Такие системы являются более гибкими, однако регулируемые параметры выбираются для предельных условий и при их использовании в более благоприятных условиях потенциальные возможности систем не всегда реализуются полностью. Регулирование может быть предусмотрено, например, для таких параметров, зависимость показателя эффективности от которых изменяется скачком, т.е. система либо решает задачу некоторым расходом средств с определенным уровнем эффективности, либо не решает совсем (например, досягаемость или область применения системы).

Оценка эффективности систем, предусматривающих регулирование параметров  $\{\alpha\}_{\text{пер}}$ , может проводиться из условия [8]:

$$W\left[\{\alpha\}, \{\alpha\}_{\text{пер}}(\{\beta\}), \{\beta\}\right] \rightarrow \frac{\text{extr}}{\{\alpha\}_{\text{пер}}}; \quad \alpha_{i\text{пер}} \in \left[\alpha_{i\text{пер}}^{\min}, \alpha_{i\text{пер}}^{\max}\right], \quad (2)$$

где  $\{\alpha\}$  – фиксированные параметры рассматриваемого варианта системы;  $\{\beta\}$  – вариант условий применения системы.

Показатель  $W$  в этом случае определяется для областей неопределенности  $\{\beta\}$ .

Компоненты АСУ располагают определенной мерой ресурсов, которые обеспечивают реализацию различных параметров, определяющих эффективность системы. Изменение параметров для компенсации неопределенности может быть связано с взаимным перераспределением расходуемых ресурсов для реализации того или иного параметра. Такие параметры обычно являются взаимозависимыми, и изменение одного из них связано с изменением другого.

При функционировании АСУ перераспределение располагаемых ресурсов связано с выбором соответствующих параметров компонентов системы в пределах заданных ограничений. На этапе реализации адаптивных возможностей необходимо предусмотреть такие решения, которые позволят в будущем рационально использовать ресурсы системы в зависимости от конкретных условий.

Перераспределение расходуемых ресурсов позволяет [9]:

- наиболее рационально использовать располагаемые ресурсы в различных условиях;
- исключить ошибки при создании систем с длительным периодом функционирования;
- снизить потребные затраты на модернизацию и усовершенствование систем;
- обеспечить универсальность средств.

Выбор рациональных решений по компонентам системы, предусматривающим перераспределение расходуемых ресурсов, основан на определении перечня управляемых параметров и ресурсов, обеспечивающих изменение этих параметров, а также на оценке диапазона изменения параметров и запаса ресурса для компенсации заданной области неопределенности.

### *Решение задачи управления*

Первая задача решается на основе оценки предпочтительности параметров и ресурсов, выбираемых в качестве перераспределяемых для вариации параметров в зависимости от условий. Для этого определяют параметры  $\alpha_i, i = 1..n$ , изменение которых возможно за счет перераспределения  $j$ -го ресурса  $G_j$ , и определяют взаимосвязь параметров и ресурсов:

$$\alpha_i = \alpha_i(g_{ji}, \dots); \quad \sum_{i=1}^n g_{ji} \leq G_j, \quad (3)$$

где  $g_{ji}$  – количественная мера ресурса  $G_j$ , расходуемая на реализацию соответствующего параметра  $\alpha_i$ .

Диапазон неопределенности условий предполагается заданным:  $\{\beta\} \in [\{\beta\}_n, \{\beta\}_n]$ .

Для оценки эффективности данного способа адаптации определяется удельный прирост эффективности за счет взаимного перераспределения единицы расходуемого ресурса между каждой парой параметров  $i, i + 1$  (вариант условий  $\{\beta\}$  фиксируется):

$$\Delta W_{i,i+1}^{\text{уд}} = \frac{W_a(i, i + 1, \{\beta\}) - W_m(\{\beta\})}{\Delta g_{ji}}, \quad (4)$$

где  $W_a, W_m$  – эффективность адаптивной и монопараметрической систем соответственно.

Полученные значения представляются в виде матриц  $\|\Delta W_{i,s}^{\text{уд}}\|$  для различных ресурсов  $G_j$  и условий  $\{\beta\}_v$ . Эти матрицы являются основой анализа предпочтительности параметров и ресурсов для перераспределения.

Диапазон изменения параметров и запас расходуемого ресурса может определяться на основе анализа оптимального распределения ресурсов в каждой точке области неопределенности. Диапазон изменения параметров оценивается сопоставлением минимального и максимального их значения в области неопределенности

$$[\infty_i] \in \left[ \min_{\{\beta\}} \alpha_i^{opt}(\{\beta\}); \max_{\{\beta\}} \alpha_i^{opt}(\{\beta\}) \right]. \quad (5)$$

Оценка требуемого запаса ресурса, выделяемого для компенсации неопределенности, проводится на основе анализа зависимости показателя эффективности от располагаемого ресурса в диапазоне неопределенности с учетом возможностей конструктивных схем по изменению запаса ресурса.

Изложенный подход к анализу перераспределения расходуемых ресурсов можно распространить также и на другие типы ресурсов при соответствующем обеспечении вариации параметров.

Следует отметить, что АМС позволяют наиболее рационально распределить функции между разнотипными модулями исходя из наивысшей эффективности всей системы. Поэтому к этому направлению компенсации примыкает перераспределение функций между компонентами. При групповом использовании разнотипных средств перераспределение функций может состоять в том, что часть средств может предназначаться для наиболее эффективного выполнения одних фаз действий (например, получение информации и распределение с передачей данных на другие средства), а другая часть ориентирована на преимущественное выполнение других фаз (например, завершающих). При этом требуется «гибкое» построение группы средств с возможностью перестроения в ходе операции и дифференцированное оснащение их оборудованием в соответствии с выделенными фазами. Перераспределение функций между агрегатами предусматривает использование многофункциональных и многорежимных компонентов (агрегатов). Выбор того или иного режима функционирования либо их комплексирование осуществляется в зависимости от конкретных условий и этапов функционирования.

В качестве других возможных путей адаптации можно рассматривать изменение конструкции средств, использование многоканальных средств получения информации, реализацию предельных возможностей, учет конкретных исходов, комплексное использование различных путей.

В модели функционирования адаптивной АСУ должны быть отражены следующие особенности:

– оснащение средств адаптивно-модульными компонентами должно характеризоваться возможными вариантами соотношений числа разнотипных элементов  $n_i$  с отражением предельных значений числа элементов каждого типа:

$$n_1, n_2, \dots, n_i, \dots; \quad n_i \in [n_i^{\min}, n_i^{\max}], \quad (6)$$

а также их основными характеристиками, определяющими эффективность;

– возможность регулирования параметров целесообразно задать диапазоном  $[\alpha_i^{\min}, \alpha_i^{\max}]$  дискретностью регулирования  $\Delta\alpha_i$ ;

– возможность перераспределения расходуемых ресурсов  $R$  для изменения различных параметров  $\alpha_1, \alpha_i, \dots, \alpha_n$  в ходе функционирования может быть задана схемой перераспределения в виде графа и ограничением на располагаемый ресурс  $G(\alpha_1, \alpha_i, \dots, \alpha_n) \leq G_0$ ;

– перераспределение и комплексирование функций различными компонентами может характеризоваться соответствующими показателями выполнения функций  $P_\Phi$  и возможностью их использования другими компонентами в интересах системы в целом  $P_\Pi(P_\Phi)$ ;

– «гибкое» групповое построение и перестроение разнотипных средств требует задания пространственно-временной  $X(t)$  и комбинаторной  $K$  составляющих модели группы средств.

Реализация адаптивных алгоритмов применения АСУ может быть задана логическими схемами, построенными в виде графов возможных исходов и соответствующих им характеристик адаптивных компонентов (рис. 2).

При описании условий первой группы их характеристики целесообразно задавать в виде исходных данных возможными вариантами в диапазоне неопределенности  $[\{\beta\}_n, \{\beta\}_k]$  либо задавать в процессе моделирования функционирования АСУ. При этом параметры могут задаваться вначале более укрупненно (например, область возможного положения объектов), затем с учетом возможности получения информации – все более детально (например, координаты каждого объекта, восприимчивость к обслуживанию и в пределе логическая схема функционирования).

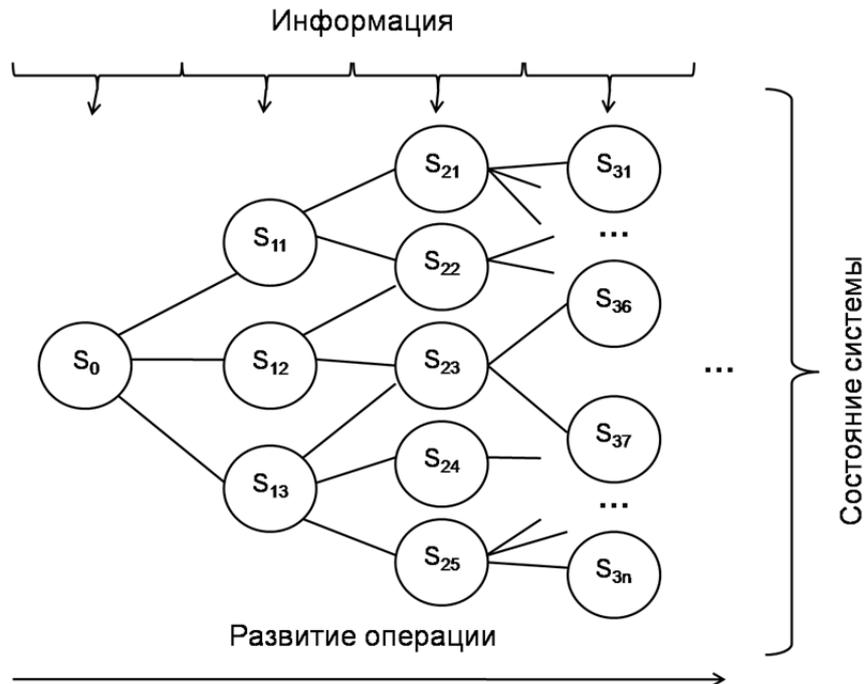


Рис. 2. Схема реализации адаптивных алгоритмов

Аналогичное поэтапное описание может характеризовать и средства активной реакции объекта (вначале факт наличия, затем характеристики досягаемости, производительности и т.д.).

### Заключение

Совокупность действий, выполняемых в ходе операции, может моделироваться на основе метода типовых фаз. Для адаптивных компонентов принципиальное значение имеет фаза получения информации, так как от ее результата зависит вся последующая совокупность действий. Основной особенностью моделирования действий является описание их результата не только вероятностью выполнения или математическим описанием достигнутого успеха, но и всевозможными исходами, так как конкретный исход может повлиять на дальнейшее поведение адаптивных компонентов. Совокупность исходов, которые могут иметь место в ходе операции, удобно представлять графом возможных исходов.

### Список литературы

1. Буряков, В. А. Принятие решений в автоматизированных системах управления / В. А. Буряков, А. И. Годунов, А. Ю. Бочановский ; под ред. А. И. Годунова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – 448 с.
2. Кабалдин, Ю. Г. Применение нейросетевых моделей процесса резания в системах адаптивного управления / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, А. М. Шпилев // СТИН. – 2002. – № 3. – С. 3–7.
3. Жданов, А. А. Об одном имитационном подходе к адаптивному управлению / А. А. Жданов // Вопросы кибернетики. – М., 1996. – С. 171–206.
4. Жданов, А. А. Об одном подходе к адаптивному управлению / А. А. Жданов // Анализ и оптимизация кибернетических систем : сб. науч. тр. – М. : ГосИФТП, 1996. – С. 42–64.
5. Жданов, А. А. Формальная модель нейрона и нейросети в методологии автономного адаптивного управления / А. А. Жданов // Вопросы кибернетики. – Вып. 3. – 1997. – С. 258–274.

6. Разгуляев, Л. В. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для СВ США / Л. В. Разгуляев // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 1. – С. 35–39.
7. Симанков, В. С. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов : моногр. / В. С. Симанков, Е. В. Луценко. – Краснодар : Изд-во Кубан. гос. технол. ун-та, 1999. – 318 с.
8. Юрков, Н. К. Автоматизированные и информационные технологии и аппаратура : учеб. пособие / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. – 172 с.
9. Повышение надежности в автоматизированных системах управления / А. М. Гусев, А. А. Рыжов, И. В. Романчев, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2010. – Т. 2. – С. 202–204.

**Годунов Анатолий Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра автоматики и телемеханики,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: Godunov@pnzgu.ru

**Лобачев Алексей Владимирович**

аспирант,  
кафедра автоматики и телемеханики,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: Godunov@pnzgu.ru

**Аннотация.** Проводится оценка возможности применения адаптивных алгоритмов в АСУ. Рассматривается выбор рациональных решений для неопределенных условий применения АСУ с адаптивными компонентами и особенности модели функционирования адаптивной АСУ.

**Ключевые слова:** адаптивные алгоритмы, автоматизированная система управления, эффективность, адаптивно-модульные схемы, модели функционирования.

**Godunov Anatoliy Ivanovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of automatics and telemechanics,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Lobachev Aleksey Vladimirovich**

postgraduate student,  
sub-department of automatics and telemechanics,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Abstract.** The article assesses the possibility of applying adaptive algorithms in ACS. Discusses the selection of rational solutions for undefined applications automatic control system with adaptive components and features of the model of adaptive functioning ACS.

**Key words:** adaptive algorithms, automated control system, efficiency, adaptive modular scheme, functional model.

УДК 001.51

Годунов, А. И.

**Оценка возможности применения адаптивных алгоритмов в автоматизированных системах управления / А. И. Годунов, А. В. Лобачев // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 41–47.**

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ТЕСТОВЫХ ПРОЕКЦИЯХ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

С. С. Садыков, А. В. Терехин

### *Введение*

Автоматизация производства началась в 40–50-е гг. прошлого века. Активное исследование и разработки в данной области были связаны с появлением спроса на сборочные узлы. Появление первых роботизированных систем ознаменовало качественно новый этап в развитии человеко-машинных систем, что, в свою очередь, способствовало развитию области машинного зрения, выполняющей функции распознавания объектов, располагающихся в области сцены перед роботом манипулятором. Функционирование данных системы требует разработки специализированного программного обеспечения. Точность идентификации объектов зависит от правильности выбора алгоритмов распознавания. При разработке систем автоматического распознавания актуальной задачей является проведение соответствующих исследований с целью выбора наиболее подходящих алгоритмов.

### *Теоретическая часть*

Одним из наиболее популярных подходов к распознаванию объектов на изображении является метод ***k*-средних**. В данном методе решение о принадлежности принимается на основе следующего правила.

Объект с номером  $i$  и вектором признаков  $V$  считается принадлежащим к кластеру  $B$  в случае минимума суммарного квадратичного отклонения точек кластера от центра этого кластера [1].

**Метод ближайших соседей** – простейший метрический классификатор, основанный на оценивании сходства объектов. Классифицируемый объект относится к тому классу, которому принадлежат ближайшие к нему объекты обучающей выборки. В задачах с двумя классами число соседей берут нечетным, чтобы не возникало ситуаций неоднозначности, когда одинаковое число соседей принадлежат разным классам. В задачах с числом классов 3 и более могут возникать ситуации неоднозначности. В таких случаях  $i$ -му соседу приписывается весь  $\omega_i$ , как правило, убывающий с ростом ранга соседу  $i$ . При этом правило принадлежности объекта определенному классу формулируется следующим образом.

Объект относится к тому классу, который набирает больший суммарный вес среди  $k$ -ближайших соседей [2].

### *Алгоритм вычисления оценок*

Решение о классификации объекта принимается с помощью анализа оценок близости объекта к классам. За какой класс оценка близости выше – к тому классу и относят объект. Оценки вычисляет распознающий оператор. Классифицирует объекты на основе оценок их близостей к классам решающее правило.

При вычислении оценок близости к классам учитывают близость/дальность объекта к эталонным объектам. Близость – схожесть описаний, малое расстояние между значениями признаков. При этом оценка близости объекта к классу тем выше, чем ближе он к эталонным объектам данного класса и дальше от эталонных объектов других классов. Для повышения точности распознавания данным алгоритмом вычисляются отклонения для используемого вектора признаков [2]

При распознавании алгоритмами данной группы строятся бинарные матрицы оценок принадлежности классов [3].

**Экспериментальная часть**

Исследования проводились над сгенерированными и реальными проекциями трехмерных объектов. Для исследования изображений была разработана и реализована программа-генератор объектов, которая создает 2000 проекций выбранного типа случайно расположенных на сцене, для каждого сгенерированного объекта вычисляются признаки формы [4] и производится распознавание выбранным алгоритмом. Для проведения исследований над реальными изображениями проекций трехмерных объектов был разработан модуль для системы распознавания, позволяющий открывать набор снимков, вычислять признаки проекций и распознавать объекты, которым они принадлежат. Проекция объектов для исследования представлены на рис. 1.

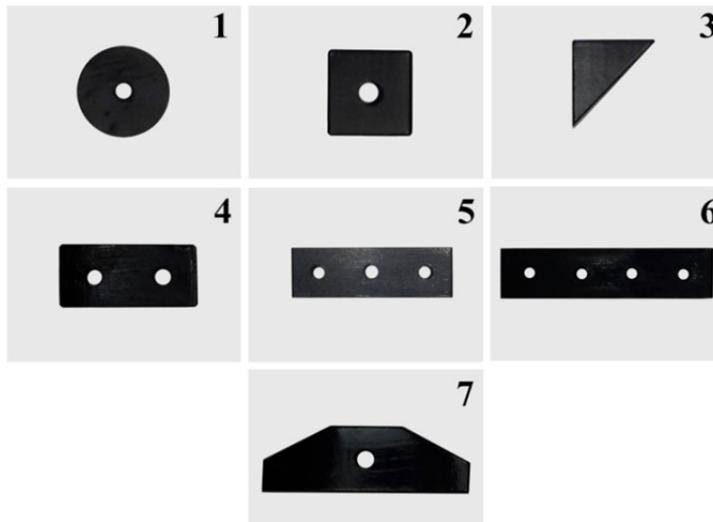


Рис. 1. Изображения проекций исследуемых объектов

Таблицы 1–3 отражают средние вероятности верного распознавания изображений проекций трехмерных объектов с использованием различного количества признаков формы [5–7].

Таблица 1

Результаты распознавания изображений проекций реальных трехмерных объектов методом *k*-средних

Метод <i>k</i> -средних						
№ Объекта/№ комбинации признаков	Вероятность распознавания					
	1	2	3	4	5	6
Объект 1	0,1	0,16	0,19	0,26	0,92	1
Объект 2	0,3	0,36	0,6	1	1	1
Объект 3	0,4	0,41	0,46	0,51	0,92	1
Объект 4	0,43	0,47	0,47	1	1	1
Объект 5	0,3	0,42	0,45	1	1	1
Объект 6	0,4	0,51	0,51	0,69	1	1
Объект 7	1	1	1	1	1	1

Таблица 2

Результаты распознавания изображений проекций реальных трехмерных объектов методом ближайших соседей

Метод ближайших соседей						
№ Объекта/№ комбинации признаков	Вероятность распознавания					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
Объект 1	0,4	0,4	0,4	0,43	0,9	1

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Объект 2	0,26	1	1	1	1	1
Объект 3	0,09	0,66	0,7	1	1	1
Объект 4	0,54	0,54	0,54	1	1	1
Объект 5	0,1	0,39	0,5	1	1	1
Объект 6	1	1	1	1	1	1
Объект 7	0,2	0,97	0,98	1	1	1

Таблица 3

Результаты распознавания изображений проекций  
реальных трехмерных объектов методом вычисления оценок

Метод вычисления оценок						
№ Объекта/№ комбинации признаков	Вероятность распознавания					
	1	2	3	4	5	6
Объект 1	0,33	0,57	0,57	0,63	1	1
Объект 2	0,15	0,48	0,99	1	1	1
Объект 3	0,01	0,78	0,79	0,84	1	1
Объект 4	0,08	0,33	0,7	1	1	1
Объект 5	0,4	0,51	0,51	0,7	1	1
Объект 6	0,3	1	1	1	1	1
Объект 7	0,12	0,3	0,3	1	1	1

Комбинации признаков формы, используемые при исследованиях, следующие:

- 1 – коэффициенты диагональных отрезков (КДО);
- 2 – коэффициент диагональных отрезков + коэффициенты диагоналей (КД);
- 3 – коэффициент диагональных отрезков + коэффициенты диагоналей + коэффициент «периметр/площадь» (КПП);
- 4 – коэффициент диагональных отрезков + коэффициенты диагоналей + коэффициент «периметр/площадь» + диагональный коэффициент формы (ДКФ);
- 5 – коэффициент диагональных отрезков + коэффициенты диагоналей + коэффициент «периметр/площадь» + диагональный коэффициент формы + прямоугольный коэффициент формы (ПКФ);
- 6 – коэффициент диагональных отрезков + коэффициенты диагоналей + коэффициент «периметр/площадь» + диагональный коэффициент формы + прямоугольный коэффициент формы + признаки отверстий (ПО).

В итоге из полученных результатов можно сделать выводы о важности отдельных признаков, добавление которых приводило к увеличению вероятности верного распознавания. Данные выводы сведены в табл. 4–6.

Таблица 4

Значимость признаков при распознавании изображений проекций  
трехмерных объектов методом  $k$ -средних

Объект	Признаки					
	КДО	КД	КПП	ДКФ	ПКФ	ПО
Объект 1	+	+	+	+	+	+
Объект 2	+	+	+	+	–	–
Объект 3	+	+	+	+	+	+
Объект 4	+	+	+	–	–	+
Объект 5	+	+	–	+	–	–
Объект 6	+	+	–	+	+	–
Объект 7	+	–	–	–	–	–

Таблица 5

Значимость признаков при распознавании изображений проекций  
трехмерных объектов методом ближайших соседей

Объект	Признаки					
	КДО	КД	КПП	ДКФ	ПКФ	ПО
Объект 1	+	–	–	+	+	+
Объект 2	+	+	–	–	–	–
Объект 3	+	+	+	+	–	–
Объект 4	+	–	–	+	–	–
Объект 5	+	+	+	+	–	–
Объект 6	+	–	–	–	–	–
Объект 7	+	+	+	+	–	–

Таблица 6

Значимость признаков при распознавании изображений проекций  
трехмерных объектов методом вычисления оценок

Объект	Признаки					
	КДО	КД	КПП	ДКФ	ПКФ	ПО
Объект 1	+	+	–	+	+	–
Объект 2	+	+	+	+	–	–
Объект 3	+	+	+	+	+	–
Объект 4	+	+	+	+	–	–
Объект 5	+	+	–	+	+	–
Объект 6	+	+	–	–	–	–
Объект 7	+	+	–	+	–	–

Время работы системы распознавания при 2000 испытаниях для рассмотренных алгоритмов следующее:

- метод ближайших соседей – 3 часа 21 минута;
- метод  $k$ -средних – 2 часа 12 минут;
- метод вычисления оценок – 1 час 45 минут.

### *Заключение*

Из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что в целом при работе всех трех алгоритмов были получены приемлемые для применения в системе автоматического распознавания результаты. При этом алгоритм вычисления оценок показал более высокую скорость работы и хорошие результаты при распознавании как на сгенерированных тестовых изображениях, так и на реальных изображениях проекций. Это говорит о хорошей обучаемости алгоритма.

### *Список литературы*

1. Садыков, С. С. Распознавание отдельных и наложенных плоских объектов / С. С. Садыков, С. В. Савичева. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2012. – 265 с.
2. Садыков, С. С. Определение диапазонов значений признаков формы плоских геометрических фигур при их произвольном расположении в области сцены / С. С. Садыков, А. В. Терехин, К. С. Захаров // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 343–345.
3. Журавлев, Ю. И. «Распознавание». Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. – М. : Фазис, 2006.
4. Журавлев, Ю. И. Алгоритмы распознавания, основанные на вычислении оценок / Ю. И. Журавлев, В. В. Никифоров // Кибернетика. – 1971. – № 4. – С. 1–11.
5. Терехин, А. В. Распознавание трехмерных объектов с использованием двух камер / А. В. Терехин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 4. – С. 54–59.

6. Терехин, А. В. Метод формирования вектора признаков для идентификации проекций реальных трехмерных объектов / А. В. Терехин // Наука и современность – 2013 : сб. материалов XX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, 20 февраля 2013 г.) / под общ. ред. к.э.н. С. С. Чернова. – Новосибирск, 2013. – 300 с.
7. Садыков, С. С. Предварительная обработка маммографических снимков / С. С. Садыков, Ю. А. Буланова, В. С. Яшков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 340–343.
8. Садыков, С. С. Определение типа поля зрения видеодатчика / С. С. Садыков, С. В. Савичева, Д. П. Гранченко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 60–66.

**Садыков Султан Садыкович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационных систем,  
Муромский институт (филиал)  
Владимирского государственного  
университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых  
(600254, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)  
8-920-913-82-42  
E-mail: sadykovss@yandex.ru

**Терехин Андрей Викторович**

старший преподаватель,  
кафедра информационных систем,  
Муромский институт (филиал)  
Владимирского государственного университета  
(602264, г. Муром, Владимирская обл.,  
ул. Орловская, 23)  
+7 (49234) 2-16-71, +7-930-834-94-21  
E-mail: terehin\_murom@mail.ru

**Аннотация.** Описывается процесс проведения экспериментальных исследований с использованием алгоритма  $k$ -средних, метода ближайших соседей, алгоритма вычисления оценок, приводятся примеры тестовых изображений, результаты исследований.

**Ключевые слова:** признак, распознавание, объект, проекция трехмерного объекта.

**УДК 004.932.2**

**Садыков, С. С.**

**Экспериментальное исследование алгоритмов распознавания бинарных изображений на тестовых проекциях трехмерных объектов / С. С. Садыков, А. В. Терехин // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 48–52.**

**Sadykov Sultan Sadykovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of information systems,  
Murom Institute (branch) of  
Vladimir State University  
named after A. G. and N. G. Stoletovyh  
(600254, 23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

**Terekhin Andrey Viktorovich**

senior lecturer,  
sub-department of information systems,  
Murom Institute (Branch) of Vladimir State University  
(602264, 23 Orlovskaja street, Murom, Vladimirskaya  
reg., Russia)

**Abstract.** Describes the process for conducting experimental research using the  $k$ -means algorithm, the nearest neighbors algorithm calculations, assessments, are examples of the test images, research results.

**Key words:** sign, face detection, object, the projection of the 3D object.

# МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

УДК 519.7

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРЕДПРИЯТИЕМ

В. К. Дедков, Н. К. Юрков

### *Введение*

Управление такими сложными системами, какими являются современные промышленные предприятия, должно опираться на основные положения системного анализа и теории принятия решений, синтезирующих аксиоматику, модели и методы ряда смежных теоретических и прикладных дисциплин (теории эффективности, теории исследования операций, теории моделирования и т.д.). Системный подход – это методология комплексного исследования сложных объектов природы, техники, общества как систем, т.е. как объединений элементов, связанных комплексом отношений и выступающих по отношению к внешней среде как единое целое [1].

Таким образом, системный подход – это общенаучная методология, которая не содержит конкретных средств исследования объектов, а обосновывает и разрабатывает принципы таких исследований.

Не является исключением и процесс управления аэрокосмическими предприятиями, деятельность которых, кроме проблем, общих для машиностроительных предприятий, существенно осложняется такими специфическими факторами, как принадлежность к оборонно-промышленному комплексу, бюджетное финансирование в рамках гособоронзаказа, наличие мобилизационного плана и ряда других факторов [2].

Ядром управления, его начальным и определяющим элементом является принятие решений. Весь комплекс управленческих вопросов, связанных с выполнением основных функций управления – планированием, организацией, регулированием и контролем, реализуется в конечном итоге через решения руководителей различных уровней. Поэтому обеспечение высокой эффективности принимаемых решений является гарантией того, что использованные ресурсы и созданные ценности не будут растрачиваться неэкономно или даже впустую.

Высокий уровень научной обоснованности принимаемых решений обеспечивается использованием адекватных научных теорий, современных информационных технологий и достоверных эмпирических фактов.

Под давлением практических проблем в последние десятилетия существенно выросли масштабы использования основных положений системотехники как для формирования соответствующей области знаний, так и в области практических приложений. Методология познания частного на основе целого и целостности позволила, опираясь на выявленные факторы и закономерности

сти, создавать модели объекта, среды и ситуации и в дальнейшем использовать эти модели для получения выводов и гипотез.

Системотехнический подход к принятию решений по управлению предприятием позволяет обосновать исходные данные, сформулировать целевые установки, произвести селекцию возможных вариантов (стратегий) достижения целей в рамках основных положений теории принятия решений, основные элементы и алгоритмы реализации которых рассматриваются в последующем изложении.

Основной задачей теории принятия решений является выработка решения, направленного на обеспечение наилучшего способа действий для достижения поставленной цели. Под целью понимается идеальное представление требуемого состояния или результата деятельности, достижимого в пределах некоторого интервала времени.

Если фактическое состояние не соответствует желаемому, то имеет место проблема – расхождение между действительным и желаемым. Выработка плана (способа) действий по устранению проблемы составляет сущность задачи принятия решений.

Каждая проблема всегда связана с определенным комплексом условий, который обобщенно называют ситуацией. Совокупность проблемы и ситуации образует проблемную ситуацию. Выявление, описание и анализ проблемной ситуации дают исходную информацию для постановки задачи принятия решений.

Описание и последующий анализ проблемной ситуации с привлечением методов формальной логики и эвристических методов направлены на решение одной из главных задач данного этапа – формирование цели, достижение которой позволяет решить проблему. При необходимости цель разбивается на подцели (задачи).

Цель считается достигнутой, если в итоге предпринятых действий получен соответствующий данной цели результат, который выражается вектором выходных параметров  $Y_n$ . Для оценки степени достижения цели ее необходимо формализовать. Вопрос формализации цели обычно решается путем введения множества требуемых значений параметров целеполагания  $\{Y_{<n>}^d\}$ , задающих требуемый результат предпринимаемых действий.

Перечень и значения данных параметров определяются по результатам анализа проблемной ситуации. Тогда формализованная запись разрешения проблемной ситуации или достижения заданной цели может быть записана следующим соотношением:

$$Y_{<n>} \in \{Y_{<n>}^d\} \approx U,$$

где  $U$  – множество возможных исходов операции;  $\{Y_{<n>}^d\}$  – множество заданных (или допустимых) значений параметров.

Для достижения поставленной цели необходима целенаправленная деятельность – операция. Под операцией понимают упорядоченную совокупность взаимосвязанных действий, объединенных общим замыслом и направленных на достижение цели операции.

В ходе операции, т.е. в процессе выполнения совокупности определенных действий, осуществляется преобразование ресурсов в требуемый результат, соответствующий поставленной цели  $Y_{<n>}^d$ . Ресурсы, используя которые, лицо, принимающее решения (ЛПР), может добиваться поставленной цели, называются активными средствами операции.

Способы действий, т.е. способы использования активных средств, ведущие к достижению цели операции, называются стратегиями (вариантами решений).

Формирование исходного множества стратегий и дальнейшее его сужение до множества допустимых стратегий  $u \in U$  и наилучшей стратегии  $u^*$  – один из важнейших этапов процесса принятия решений. Данная процедура осуществляется ЛПР и экспертами путем логических заключений, интуиции, проведения исследований и экспериментов или формально в зависимости от степени формализации информации.

Исход операции зависит от множества различных по своей природе факторов, характеризующих качество, способы и условия использования активных средств, применяемых ЛПР при реализации операции. Из этого множества выделяется подмножество так называемых

управляемых факторов, которые находятся в распоряжении ЛПП и используются им для формирования множества стратегий и на которые он может влиять по своему усмотрению. Все остальные факторы рассматриваются как неуправляемые и образуют комплекс условий проведения операции.

Поскольку исход операции определяется как выбранными стратегиями, так и комплексом условий проведения операции, формирование комплекса условий является одной из важнейших процедур принятия решений.

Об успешности операции судят по степени различия между ее реальным результатом  $Y$  и требуемым  $Y_{<n>}^d$ , т.е. по степени достижения цели операции, определяющей ее эффективность. Мету интенсивности проявления эффективности называют показателем эффективности  $W$ .

Для выбора наилучшей стратегии на основе сравнения эффективности допустимых стратегий используется критерий эффективности – правило, позволяющее сопоставить стратегии, характеризующиеся различной степенью достижения цели операции, и осуществлять направленный выбор стратегии из множества допустимых.

ЛПП принимает решения в рамках постановки задачи оценивания эффективности операции, выбора и формирования показателя и критерия эффективности, получения значения показателя по результатам моделирования [3].

На основании введенных понятий и определений может быть сформирована модель проблемной ситуации в виде следующей системы взаимосвязанных элементов:

$$\langle U, Z, H, G, Y, \Psi, W, K, P, \rangle,$$

где  $U$  – множество допустимых стратегий ЛПП;  $Z$  – множество значений определенных и неопределенных факторов, задающих комплекс условий проведения операции;  $G$  – множество исходов операции;  $Y$  – числовое выражение результата операции;  $H$  – модель операции, т.е. отображение, ставящее в соответствие множествам стратегий  $U$  и факторов  $Z$  множество результатов  $Y(G) \rightarrow \rightarrow (H: U^* A \rightarrow Y)$ ;  $W$  – показатель эффективности;  $\Psi$  – оператор соответствия «результат – показатель» ( $\Psi: Y \rightarrow W$ );  $K$  – критерий эффективности;  $P$  – модель предпочтений ЛПП на элементах множества

$$D = \{U, Z, G, Y, W, K\}.$$

Использование рассмотренной модели проблемной ситуации позволяет представить процесс выработки решения в виде двух основных взаимосвязанных процессов: процесса получения результатов (рис. 1)

$$\Psi : \{H: U^* Z \rightarrow Y(G)\} \rightarrow W;$$

и процесса анализа результатов

$$P \rightarrow K: U \rightarrow U^*.$$

Системотехнический анализ проблемной ситуации и процесс выработки решений представляет логическую последовательность действий на заданном уровне его вертикальной декомпозиции и включает этапы, представленные на рис. 1.

Актуальная проблема высокоэффективного управления сложными иерархическими распределенными интегрированными производственными системами может быть решена за счет развития единого функционально-целевого подхода к синтезу систем их управления на основе информационных технологий и создания средств построения концептуальной модели предметной области (КМПО).

При разработке систем моделирования сложных распределенных производственных систем необходимо найти компромисс между двумя противоречивыми требованиями: сведение к минимуму дополнительных разработок при непринципиальных изменениях решаемых задач и, с другой стороны, обеспечение использования результатов исследований в прикладных целях.

Совокупность взаимосвязанных моделей как система может быть поставлена в соответствие жизненному циклу изделия, т.е. можно говорить о соответствии жизненного цикла системы моделей жизненному циклу (ЖЦ) изделия. Управляющие решения, принятые на уровне моделей, реализуются затем на этапах жизненного цикла изделия. Процесс совершенствования системы моделей и изделия, по сути дела, неразделим и управляется изменением воздействий.

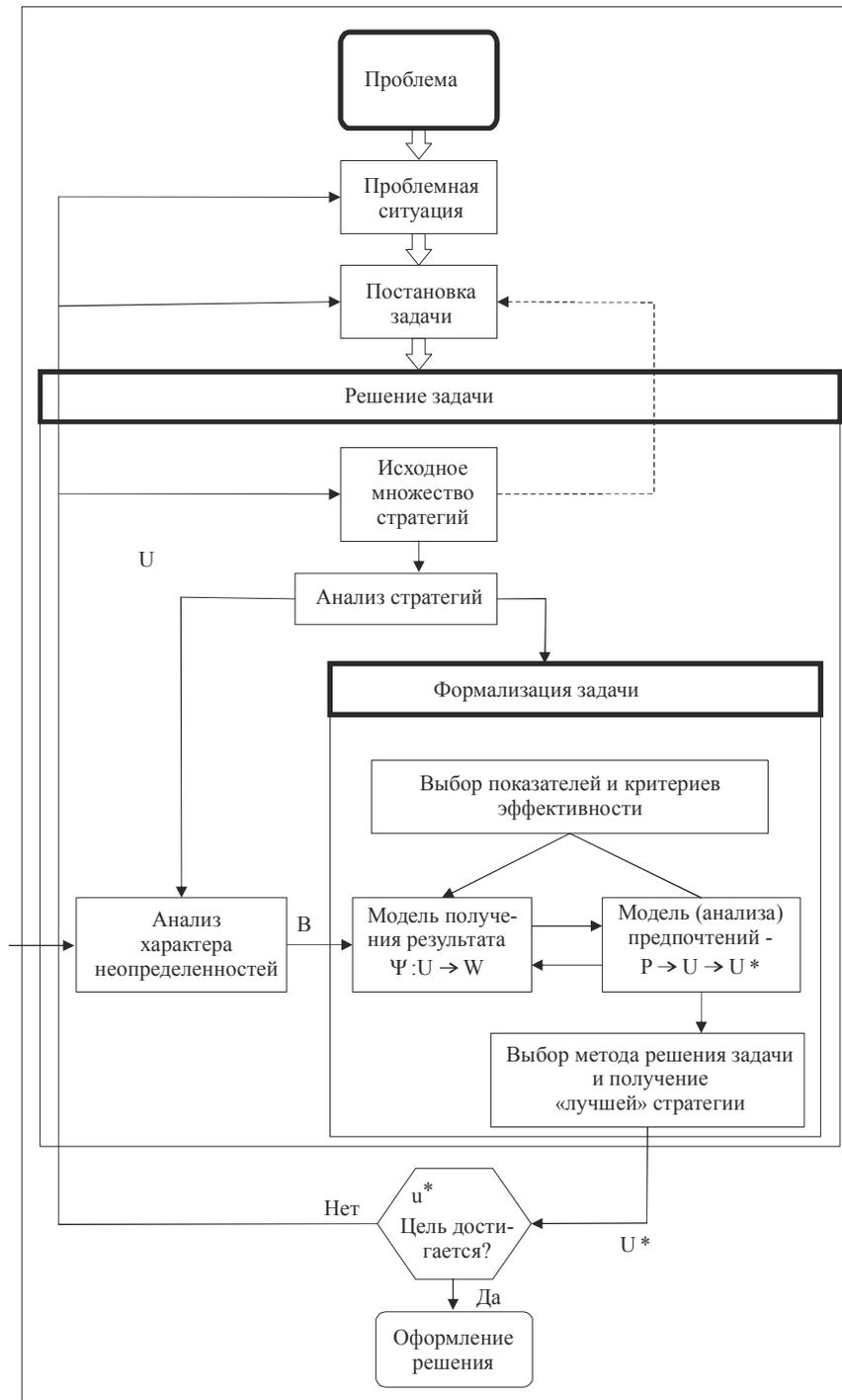


Рис. 1. Схема этапов решения задачи управления

На каждом из рассматриваемых этапов ЖЦ используются модели разной степени проработанности, выполненные разными учеными в разные годы. Для объединения моделей сложной системы в единый комплекс необходимо иметь возможность использования наработанных средств моделирования наиболее просто и эффективно. Построение концептуальной модели соответствует переходу от описательного представления знаний к их формальному представлению на декларативном языке, допускающем единственную интерпретацию. КМПО является декларативной, так как в ней описывается состав, структура и отношения между объектами и процессами, независимо от конкретного способа их реализации в компьютере.

Концептуальная модель наряду с описанием структуры объектов и процессов обработки информации, способов их взаимодействия отражает такие свойства, как принадлежность процесса

или объекта к некоторому типу, количественные характеристики объектов и процессов. В связи с этим, помимо деления элементов модели на объекты и отношения между ними, выделяется класс атрибутов (или свойств), вступающих с собственно объектами модели (информационными объектами и процессами) в бинарные отношения, описываемые функционально. Концептуальная модель (КМ) определяется как непротиворечивая совокупность высказываний, истинных для данной предметной области, включая возможные состояния, классификации, законы, правила. Основой КМ является не алгоритмическая модель передачи и преобразования данных, как в аналитических моделях, а декларативное описание структуры объекта и взаимодействия его составных частей. Таким образом, КМПО изначально ориентирована на формализацию знаний экспертов.

В КМПО определяются элементы исследуемой предметной области и описываются отношения между ними, которые задают структуру и причинно-следственные связи, существенные в рамках определенного исследования [5]. Создание КМ является первичным и основным (по потребляемым ресурсам) этапом моделирования, так как для сложных задач с большим объемом данных эта модель во многом определяет реализацию алгоритмов, характер программ и способы общения исследователей с компьютером.

Пусть задана совокупность элементов множества  $U$ , называемая пространством задания модели. Каждой точке  $x \in U$  предписано значение функционала (функции) качества  $f(x)$ , характеризующее некоторое свойство сложной производственной системы на данном этапе ЖЦ (например, производительность, надежность, качество и т.п.). В пространстве  $U$  действует группа преобразований  $G$ , перемещающая точки этого пространства вместе с заданными в них значениями функционала качества (рис. 2).

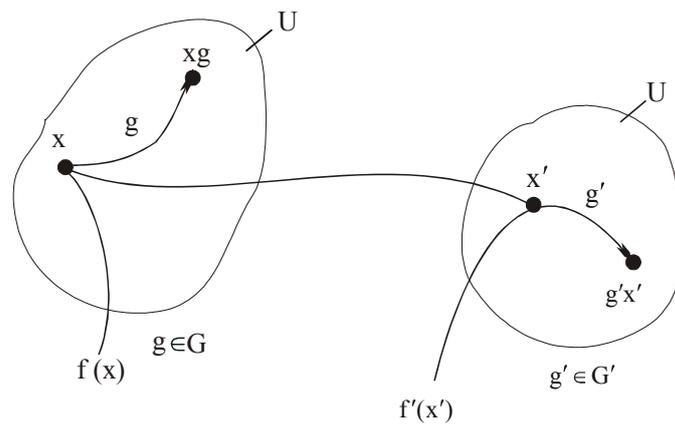


Рис. 2. Схема преобразования моделей

Примем совокупность, состоящую из пространства  $U$ , группы  $G$ , действующей в ней, и функции качества  $f(x)$ , за модель предметной области  $M$ . Примем  $f(x)$  – за исходное качество, а  $f(gx)$  – качество, получаемое преобразованием  $g$ , тогда всевозможные преобразованные функции качества  $f(gx)$  ( $g$  пробегает всю группу  $G$ ) образуют полное множество управлений, которое обозначим (см. рис. 2):

$$S = f(gx), g \in G.$$

Если исходную функцию качества  $f(x)$  принять за качество изделия в начале его жизненного цикла, то полное множество управлений  $S$  определяет всевозможные изменения исходного положения, в частности, если  $G$  – группа преобразований функции качества изделия на всех этапах жизненного цикла, – всевозможные состояния изделия в пространстве  $U$ .

Пусть известен и фиксирован набор параметров изделия на всех этапах его жизненного цикла. Тогда эталонное исходное качество изделия на каждом этапе ЖЦ будет характеризоваться своими функциями качества  $f_i, i = 1, 2, \dots, k, k$  – число этапов.

Для каждого этапа ЖЦ сформируем полное множество управлений

$$S_1 = f_1(gx) \Big|_{g \in G}; S_2 = f_2(gx) \Big|_{g \in G}; \dots, S_k = f_k(gx) \Big|_{g \in G}.$$

Если при  $i \neq j$  пересечение полных множеств управлений пусто, т.е.

$$S_i \cap S_j = 0,$$

то будем говорить, что объекты попарно различимы.

Условие (2) означает, что не существует таких  $g_1$  и  $g_2 \in G$ , при которых

$$f_i(g_1x) = f_j(g_2x), \quad i \neq j.$$

Если (3) выполняется, то по модели  $M$  можно определить преобразования  $g$  (в частном случае – параметры функции качества).

Пусть в результате некоторого преобразования исходной модели  $M$  будет получена модель  $M'$ , характеризующаяся новым пространством задания  $U'$ , группой  $G'$ , действующей в этом пространстве, и функциями качества для каждого этапа жизненного цикла  $f_1'(x')$ ,  $f_2'(x')$ , ...,  $f_k'(x')$ . Если при этом попарные пересечения новых полных множеств управлений пусты, т.е.  $S_i' \cap S_j' = 0$  при  $i \neq j$ , то объекты в новой модели различимы.

Такие преобразования будем считать допустимыми. Среди допустимых будем искать такие преобразования моделей  $M$  в  $M'$ , при которых размерность пространства  $U'$  не больше размерности пространства  $U$ , а группа  $G'$  либо совпадает с  $G$ , либо является некоторой ее подгруппой. Второе условие важно для того, чтобы по новой модели  $M'$  можно было определить все или хотя бы часть параметров преобразования.

Преобразование моделей  $M \rightarrow M'$  является, по сути, синтезом моделей этапов жизненного цикла изделия, который проводится на основе концептуальной модели предметной области.

Как следует из анализа алгоритма рис. 2, формализация задачи является одним из основополагающих этапов синтеза систем управления. При этом построение концептуальной модели является непреложным аспектом моделирования. Рассмотрим алгоритм построения концептуальной модели системы [4].

Традиционно КМ строятся на основе диалога человек-машина, при наличии развитого интерфейса человека с информационной моделью системы. На рис. 3 представлена схема управления, в которой управляющие воздействия вырабатываются на основе взаимодействия информационной и концептуальной моделей при принятии решения.

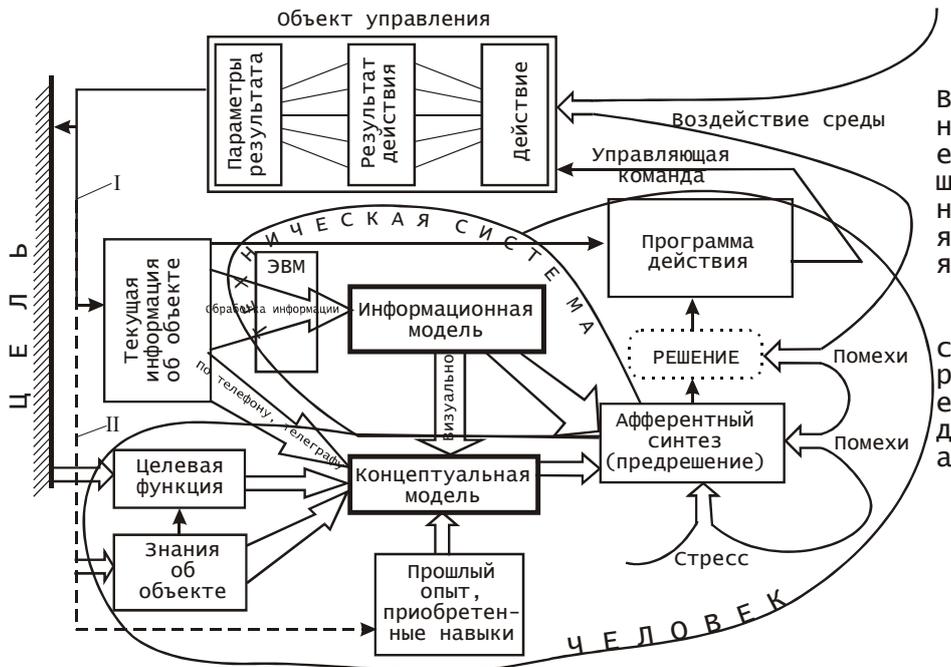


Рис. 3. Схема управления на основе взаимодействия информационной и концептуальной моделей при принятии решений

Схема управления состоит из двух контуров обратной связи. По первому контуру обратной связи поступает информация о состоянии управляемого объекта в данный момент времени; пройдя обработку на ЭВМ, она визуально отображается на информационной модели.

Второй контур обратной связи формируется на основе организации взаимодействия человек-машина, в которой человек, основываясь на прошлом опыте, приобретенных навыках, согласуя свои действия с целевой функцией, знаниями об объекте, а также в ходе взаимодействия с информационной моделью объекта принимает решения по управлению. Для первичной формализации деятельности по выработке решений создается концептуальная модель как основа (первая стадия) моделирования.

В стадии афферентного синтеза («предрешения») решается главнейший вопрос формирования поведенческого акта: какой полезный результат должен быть получен в данной ситуации и при данной комбинации указанных побуждений. Эта стадия – начало процесса выработки решения, и здесь может быть несколько (теоретически – великое множество) вариантов решения. Мозг человека осуществляет выбор того основного варианта, который наиболее целесообразен с точки зрения цели и может дать полезный эффект в данной конкретной ситуации. При этом извлекаются (непрерывно сканируются) результаты всех прошлых действий в аналогичных ситуациях и сопоставляются с потребностью данной ситуации до тех пор, пока целевая функция (как эталон для сканирования) не станет вполне соответствовать одному из результатов прошлого. Прошлый опыт, практика, таким образом, выступает в качестве критерия истины.

Выбранное таким образом решение как замысел на предстоящее действие далее оценивается с помощью нейрофизиологического аппарата, получившего название «акцептор результатов действия». В этом акцепторе мысленно прогнозируется результат действия. Этот аппарат, опережающий и предсказывающий свойства будущего результата, в конце каждого элементарного действия немедленно сличает его параметры с параметрами прогнозированного результата, и в случае совпадения эти результаты являются «санкцией» при формировании следующего этапа поведения. Одновременно происходит так называемое «обогащение акцептора результатов действия» (самообучение интеллекта) на базе обратных связей.

### **Заключение**

Таким образом, дается решение актуальной проблемы высокоэффективного управления сложными иерархическими распределенными производственными системами за счет развития единого функционально-целевого подхода к синтезу систем их управления на основе информационных технологий и создания средств построения концептуальной модели предметной области. Анализ нейрофизиологического поведения ЛППР в процессе выбора решения по управлению сложной производственной системой позволяет оптимизировать системы поддержки принятия решений.

### **Список литературы**

1. Моисеев, Н. Н. Математические основы системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М. : Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.
2. Урличич, Ю. М. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики / Ю. М. Урличич, Н. С. Данилин. – М. : Макс Пресс, 2003. – 204 с.
3. Самарский, А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит, 2002. – 320 с.
4. Юрков, Н. К. Синтез концептуальной модели предметной области. Особенности моделирования сложных систем / Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2004. – № 2. – С. 11–14.
5. Юрков, Н. К. Особенности управления сложными системами на основе концептуальных моделей / Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2004. – № 4. – С. 14–16.

#### **Дедков Виталий Кириллович**

доктор технических наук, профессор,  
научный сотрудник отдела безопасности  
и нелинейного анализа,  
Учреждение Российской академии наук,  
Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН  
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)  
8-(495)-135-61-95  
E-mail: dedkov-33@rambler.ru

#### **Dedkov Vitaliy Kirillovich**

doctor of technical sciences, professor, the scientific  
worker of the division of safety and nonlinear analysis,  
Dorodnicyn Computer Center  
of the Russian academy of sciences  
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

**Юрков Николай Кондратьевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
8-(412)-56-43-46  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** Ядром управления, системой является принятие решений. Системотехнический подход к принятию решений позволяет обосновать исходные данные и произвести селекцию возможных вариантов (стратегий) достижения целей. Стратегии – это способы использования активных средств, направленных на достижение цели операции. Рассмотрены способы достижения цели операции. Показано, что процесс выработки решения состоит из процесса получения результатов и процесса анализа результатов. Дан подход к построению концептуальной модели предметной области. Получена схема принятия решений на основе взаимодействия информационной и концептуальной моделей.

**Ключевые слова:** системный подход, принятие решений, проблемная ситуация, критерии и показатели эффективности процесса, концептуальная модель.

УДК 519.7

**Дедков, В. К.**

**Применение системотехнического анализа при управлении предприятием / В. К. Дедков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 53–60.**

**Yurkov Nikolay Kondrat'evich**

doctor of technical sciences, professor,  
head of sub-department of radio equipment  
design and production,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Abstract.** The management system is the core of decision-making. System technical decision-making approach enables you to substantiate the source data and make the selection options (strategies) for achieving the objectives. Strategy is the use of active means to achieve the objectives of the operation. Shows that the decision-making process is the process of getting results and the analysis of the results. An approach to the construction of the conceptual domain model. Received decision tree based on the interaction of information and conceptual models.

**Key words:** systematical approach, decision making, problem situation, criteria and indicators of the efficiency of the process, the conceptual model.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С. В. Волков, В. И. Кулапин, А. В. Светлов

### *Введение*

В условиях повышения уровня террористической и криминальной опасности в мире государство обязано сделать все возможное для обеспечения антитеррористической защиты.

Одно из общеизвестных правил создания технических средств безопасности гласит, что трудно, а скорее всего, невозможно создать систему, которая однозначно и всесторонне решала бы задачу обнаружения любых террористических средств. Поэтому приоритет остается за комплексным подходом к решению проблемы [1, 2].

В настоящее время существует не так много систем обеспечения комплексной безопасности, в которых достаточное внимание уделено противодействию терроризму. Но есть несколько областей, где такие системы разработаны и внедрены.

### *1. Система «Безопасный город»*

Проект «Безопасный город» в современном его понимании начал внедряться в разных странах мира примерно с начала 2000-х гг. Его появление было абсолютно естественным и соответствовало вызовам времени – разрастанию мегаполисов, массовой и разнородной миграции, усложнению городской инфраструктуры, которая становилась все более дискретной и все более трудно контролируемой.

Идея «Безопасного города» предполагала построение комплексной распределенной системы, способной объединить в единую управляемую структуру разнородные элементы городской среды: жилищно-коммунальное хозяйство, автомобильные магистрали, стратегически важные объекты, такие как аэропорты, вокзалы, метро и т.д., а также места массового скопления людей (стадионы, рынки, остановки общественного транспорта).

Целью проекта было создать гибридную автоматизированную систему с высокими интеграционными возможностями, которая позволила бы решить основные технические задачи современного города. В целом зону покрытия «Безопасного города» можно разделить на три крупных кластера:

- видеоохрана и безопасность городской среды [3, 4], в том числе дорог, обеспечиваемая органами правопорядка;
- управление объектами ЖКХ [5, 6];
- охрана объектов стратегического назначения [7].

При этом такая система должна быть чрезвычайно гибкой и масштабируемой, относительно легко «сжиматься» и «расширяться» в соответствии с городскими нуждами, приоритетными задачами и внешними условиями. Пример иерархической структуры системы «Безопасный город» показан на рис. 1.

При выборе оборудования для «Безопасного города» важно учитывать, что затраты на систему всегда распределяются по трем ключевым направлениям [8]: настройка, владение, обслуживание.

Заказчики нередко упускают из виду последние два пункта, а это чревато последующей неэффективностью работы систем безопасности либо напрасным расходованием средств. Кроме того, специалисты, занятые в обслуживании системы, как правило, приходят из служб безопасности особо охраняемых объектов, со сформированным набором навыков и рабочих моделей. При этом не учитывается, что в городе все по-другому – совсем не так, как в музее, или на военном заводе. А между тем контроль технического состояния оборудования очень важен. Возьмем, к примеру,

камеры, которые располагаются над ключевыми высоко загруженными транспортными магистралями. Освещенность улиц во многих городах далека от желаемой, а высота подъема взвеси из воды, гари и реагентов может достигать 10 м над уровнем дорожного полотна, поэтому камеры быстро загрязняются. Очистить такую камеру можно лишь с привлечением специальных служб и временной остановкой дорожного движения, что дорого и трудно. Есть также масса других нюансов, способных повлиять на эффективную работу камеры: человеческий фактор в форме саботажа, заслон объектива, сгорание матрицы, засветка вследствие неправильной установки, плохая видимость при неблагоприятных погодных условиях и т.д. Поэтому при выборе оборудования для «Безопасного города» очень важно обеспечить наличие инструментов видеоналитики, в частности, сервисных детекторов, подающих сигнал в случае сбоев в работе видеокамер.

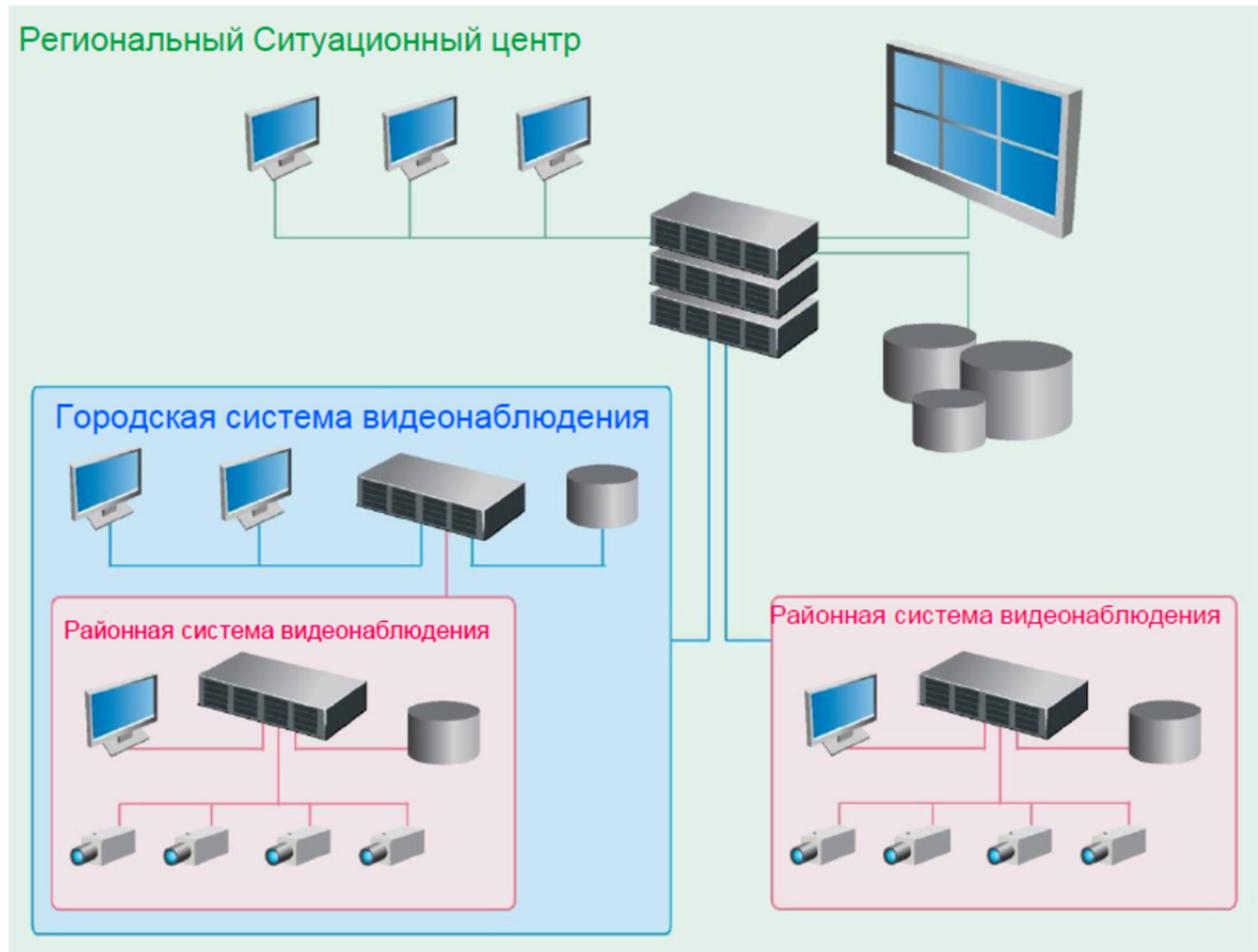


Рис. 1. Пример иерархической структуры системы «Безопасный город»

Еще одним важным аспектом внедрения «Безопасного города» следует признать отсутствие четких критериев того, что такое «нарушение порядка» и «угроза» в условиях городской среды, и каков, собственно, профиль нарушителя. Для особо охраняемых объектов любой сложности и масштаба составить такие критерии относительно не трудно – всегда известно, что именно охранять и от какого рода посягательств. А значит, можно грамотно подобрать и установить датчики, настроить детекторы и т.д., чтобы своевременно реагировать на тревоги. Городская же среда чрезвычайно вариативна и изменчива: в городе можно делать практически все, кроме очевидных случаев, связанных с уголовными преступлениями и злым хулиганством. Все дело в том, что не существует внятных поведенческих моделей, которые в этой среде можно маркировать как тревожные. Оператор может путем последовательного просмотра заметить явное преступление либо обнаружить его уже после того, как оно произошло. Соответственно, в таких условиях сложно оснастить систему всеми инструментами, необходимыми для фиксации тревожных событий и реагирования на них.

Всегда, когда речь идет о масштабных распределенных интеллектуальных системах видеонаблюдения, актуализируется вопрос о том, куда стекаются данные с камер и каким образом происходит их обработка. Здесь на данный момент используется три подхода:

- 1) централизованное хранилище, единый дата-центр;
- 2) распределенная система хранения на удаленных серверах;
- 3) распределенная вычислительная сеть временного хранения архива с последующим выборочным дублированием его в централизованном дата-центре.

Последний подход – наиболее интеллектуальный и надежный способ хранения архива, однако и наиболее затратный.

Резюмируя, отметим, что в целом «Безопасный город» – система полезная и в большинстве случаев оправдывающая себя. А успех ее реализации во многом зависит от продуманности финального решения на стадии проекта.

Во исполнение поручения президента РФ от 29 июня 2007 г. в Пензенской области создан Аппаратно-программный комплекс «Безопасный город». В городе Пенза установлена система VOCORD Tahion – это территориально-распределенная система обзорного видеонаблюдения [9] с развитыми средствами видеоаналитики (рис. 2). Система состоит из 35 пунктов видеонаблюдения, включающих в себя 90 камер наружного наблюдения, восемь рабочих мест операторов видеонаблюдения, четыре сервера архивирования видеоинформации и более 80 километров оптоволоконных линий связи. В настоящее время ведется работа по модернизации комплекса.

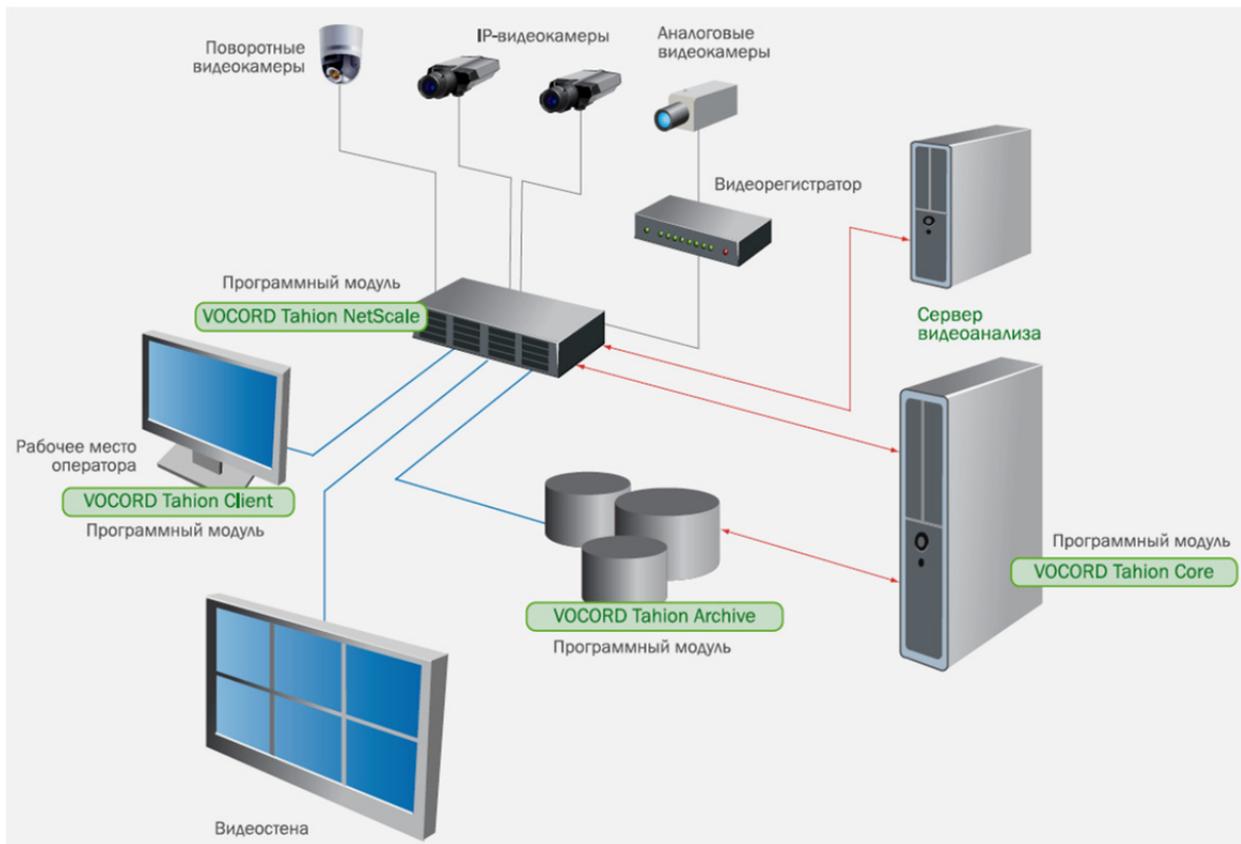


Рис. 2. Архитектура системы VOCORD Tahion

Ключевыми особенностями системы VOCORD Tahion являются:

- неограниченная масштабируемость;
- распределение функций между сервисами;
- иерархическая структура;
- высокая производительность;
- видеоаналитика;
- поддержка IP-оборудования и открытых стандартов.

Решения VOCORD для реализации проектов «Безопасный город»:

- контроль нарушений Правил дорожного движения;
- обзорное видеонаблюдение;
- некооперативное распознавание лиц;
- видеонаблюдение на транспорте;
- аудиорегистрация звонков в дежурных частях, диспетчерских службах, контакт-центрах.

В системе VOCORD Tahion реализованы следующие видеоаналитические детекторы:

- движения;
- пересечения линии;
- входа/выхода в зону/из зоны;
- оставленных и унесенных объектов;
- дыма и огня;
- «саботажа» (намеренная засветка, закрытие камеры).

Система поддерживает библиотеки видеоанализа сторонних производителей. При срабатывании детектора пользователь получает оповещение в виде: индивидуального звукового сигнала, e-mail, sms [10, 11].

## ***2. Решения противодействия терроризму на критически важных объектах***

В число критически важных объектов (КВО) включены объекты ядерно-оружейного комплекса, атомные электростанции, объекты атомной промышленности, науки, а также объекты, на которых имеются радиоактивные вещества [12]. В целях обеспечения безопасности компетентные российские организации продолжают работу, направленную на создание методик, технических средств и организационных решений, обеспечивающих эффективное функционирование комплексов инженерно-технических средств физической защиты (КТСФЗ) критически важных (согласно ГОСТ Р 52551-2006) и народнохозяйственных объектов (банковских учреждений, объектов транспортной инфраструктуры, объектов нефтегазовой отрасли и т.д.). Сложность решения данной проблемы в условиях роста угрозы террористических и криминальных проявлений обусловлена необходимостью пропуска на КВО большого количества сотрудников в течение ограниченных интервалов времени при высоком качестве процедур контроля и досмотра, минимизации ошибочных действий персонала охраны, надежной защищенности периметров этих объектов от несанкционированных проникновений.

При формировании структуры конкретного комплекса технических средств охраны (ТСО) и инженерно-технической защиты (ИТЗ) необходимо учитывать: вид используемых транспортных средств (в случае транспортирования опасных и радиоактивных материалов); размеры, протяженность и конфигурацию периметра, границы охраняемых зон и рубежей охраны; наличие водной границы или границ, расположенных на пересеченной либо горной местности; виды и способы охраны.

Проблемы защиты от проникновения нарушителей на объекты по граничащим водным участкам (пространствам) и горной местности не регламентируются нормативными документами и решаются на конкретных объектах исходя из сложившейся оперативной обстановки.

При проектировании комплексов ТСО на конкретных объектах должны учитываться категория режимности объекта и категория обеспечения объекта электроэнергией, определяющие уровень его технической защищенности, планируемую тактику действий сил охраны, общие затраты на создание комплекса ТСО.

Основными разновидностями эксплуатируемых в России КТСФЗ критически важных объектов являются [12]:

- автоматизированные системы безопасности транспортирования (АСБТ) опасных и радиоактивных материалов;
- интегрированные системы безопасности стационарных объектов.

В целях повышения защищенности ядерноопасных объектов и перевозимых радиоактивных материалов (ядерные материалы, радиоактивные вещества и изделия из них) в Росатоме разработан и реализуется комплекс мер по предотвращению угроз терроризма и возникновения техногенных катастроф, по совершенствованию систем противопожарной защиты, организации спасательных работ на объектах производства, хранения, утилизации оружия и его компонентов.

С точки зрения возможности реализации захвата (хищения) опасных материалов транспортирование является наиболее уязвимым элементом их жизненного цикла, что обусловлено целым рядом факторов (невозможностью создания запретной зоны вокруг транспортного средства, ограниченностью сил охраны, неопределенностью местонахождения транспорта при большой протяженности маршрутов и др.). С целью минимизации вероятности хищения (захвата) ядерных материалов в процессе транспортирования руководством Росатома было принято решение о создании отраслевой автоматизированной системы безопасности транспортирования (АСБТ) ядерных материалов. В создании системы с 1996 г. участвовали МВД, ФСБ, Минобороны и МЧС России. В процессе разработки концепции АСБТ были уточнены модель угроз, тактика действий сил охраны, определены функциональные задачи системы безопасности с учетом специфики подвижных объектов. АСБТ обеспечивает обнаружение и задержку доступа нарушителя к перевозимым грузам; мониторинг специальных перевозок; контроль действий технического персонала и сил охраны, сопровождающих груз; защиту информации; оповещение и информационную поддержку принятия решений в случае попытки несанкционированного доступа к грузу, а также при организации работ по ликвидации последствий нештатных (аварийных) ситуаций, возникающих в процессе транспортирования, благодаря чему минимизируется возможность хищения ядерных материалов.

В состав АСБТ входят:

- система обнаружения несанкционированного доступа к ядерным материалам;
- физические барьеры и средства активной задержки;
- я и состояния физической защиты перевозимого груза предприятиями-отправителями (получателями) и центральной диспетчерской службой Росатома;
- автоматизированные рабочие места в соответствующих службах МВД и Минтранса России;
- телекоммуникационная система.

Аппаратура и системы ИСБ (КТСФЗ), разработанные отечественными организациями, характеризуются высокой надежностью за счет «горячего резервирования» критичных элементов, применения источников бесперебойного электропитания, блоков грозозащиты оборудования со стороны линий связи, самовосстанавливающихся протоколов обмена информацией и ряда оригинальных программно-технических решений. В большинстве случаев обеспечивается защищенность служебной информации и персональных данных благодаря специальным мерам на уровне локальной вычислительной сети. Концепция построения систем физической защиты (СФЗ) предусматривает иерархическую структуру охраняемых зон критически важных объектов: наличие защищенной, внутренней и особо важной зон. Вход в особо важные помещения осуществляется только при выполнении правила «двух лиц». В целях исключения возможности совершения нарушителем диверсионной акции, несанкционированного съема информации, создания предпосылок к возникновению чрезвычайной ситуации (нарушителя необходимо обнаружить и нейтрализовать на подступах к местонахождению ценностей объекта до начала акции) организуется глубокое эшелонирование рубежей физической защиты с выделением периметральной зоны охраны, вынесенной далеко за пределы внутренних и особо важных зон, а также разделением территории на отдельные локальные объекты охраны. Обязательная система зонирования позволяет создать запас для компенсации потерь времени на реакцию охраны. Высокий уровень защищенности таких объектов существенно снижает мотивацию правонарушений.

### ***3. Системы безопасности на транспорте***

Одним из самых распространенных вариантов террористических актов на транспорте является установка взрывчатки на днище транспортных средств, это позволяет террористам работать с различными способами подрыва и получать максимальный результат при минимальной мощности и, следовательно, размерах. Это обусловлено техническими и конструктивными особенностями транспорта – комплекса из металла, электроники, органических и синтетических материалов. Немаловажную роль здесь играет и возможность быстрой закладки взрывчатки во время стоянки за территорией объекта потенциальной атаки.

Таким образом, регулярный досмотр транспортных средств – актуальное требование современного мира. Однако оно вступает в противоречие с необходимостью минимизации простоев (обычный осмотр с помощью различных ручных зеркал требует остановки машины и занимает много времени). Поэтому в последние годы были разработаны специальные автоматизированные

и автоматические комплексы визуального досмотра днища, часть из которых вообще не требует остановки транспорта [13].

Главным элементом любого комплекса досмотра днища является специальный сканер, монтируемый либо непосредственно в дорожное полотно, либо устанавливаемый и закрепляемый поверх дорожного покрытия (мобильный вариант).

Выходные сигналы от сканера подаются в цифровом виде на специальный сервер поста охраны и отображаются на компьютерном мониторе. В случае досмотра транспорта, образцы днища которого уже имеются в базе, два изображения (эталонное и фактическое) параллельно выводятся на экран и сравниваются. Процесс сравнения в зависимости от системы проводится либо визуальным оператором, либо программой, которая использует технологию машинного зрения.

В последнее время получила развитие технология 3D-видеоанализа, позволяющая по нескольким плоским срезам днища восстанавливать трехмерное изображение, повышая тем самым вероятность обнаружения закладки. Примером использования такой технологии служит система досмотра транспорта GateKeeper [13]. Существуют специальные модификации такой системы для автоматического досмотра днища железнодорожного транспорта.

Для безопасного функционирования железнодорожного транспорта в условиях террористической угрозы требуется не только осмотр днища, но и контроль целостности ж/д путей. Из множества методов контроля, используемых сегодня ж/д перевозчиками, особенно хорошо себя зарекомендовал метод неразрушающего контроля ультразвуком [14].

Ультразвуковой метод контроля целостности ж/д путей является неконтактным, экономически эффективным и к тому же довольно простым с практической точки зрения. Ультразвуковой зонд отправляет звуковую волну направленным лучом с частотой от 1 до 10 МГц. Волны проникают глубоко в рельс и при обнаружении любого разрыва отражаются и направляются обратно. Время получения эхо-сигнала, регистрируемого при таком отражении, позволяет определить расстояние от зонда до места разрыва.

### *Заключение*

В условиях значительного усиления терроризма, снижения экономических возможностей страны и уменьшения средств, выделяемых на укрепление законности и порядка, все большее значение приобретает дальнейшая координация действий всех силовых ведомств Российской Федерации. И здесь наряду с заблаговременной оперативной работой и эффективным применением подразделений специального назначения важным слагаемым успеха является построение комплексной системы антитеррористической безопасности. По опыту других стран можно сказать, что это позволит значительно сократить расход материальных средств и предотвратить гибель гражданского населения. Вот почему сегодня необходимо акцентировать внимание на задачах совершенствования подготовки и оснащения сил антитеррора, развития правовых основ, способов и приемов их использования в борьбе с возмутителями спокойствия.

В обеспечении комплексной антитеррористической безопасности за последние годы революционных изменений не произошло и принципиально новых разработок на рынке не появлялось. Фирмы в основном занимаются параметрическим совершенствованием техники, уделяя особое внимание помехозащищенности и селективности при сохранении вероятности обнаружения оружия на уровне 97–99 %.

Основные изменения произошли в области видеонаблюдения, где идет активное улучшение технических характеристик, совершенствование автоматизированных средств обработки информации, а также систем защиты информации и СКУД.

Ключевой и масштабный тренд последних лет – интеграция. Для важных и крупных объектов сохраняется тенденция монобрендовой интеграции систем для обеспечения гарантированной совместимости и наиболее полного использования функционала системы. Вместе с тем существенно возрастает ценность возможности интеграции оборудования третьих производителей для обеспечения комплексной и многофункциональной системы безопасности, базирующейся на надежном ядре. В интерфейс комплексных систем безопасности все чаще стремятся включать и мониторинг (а также управление) других инженерных систем и систем жизнеобеспечения зданий.

**Список литературы**

1. Волков, С. В. Техническое обеспечение комплексной системы антитеррористической безопасности / С. В. Волков, В. И. Кулапин, А. В. Светлов // Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : сб. науч. ст. Десятой Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза – Заречный, 7–9 октября 2014 г.) / под ред. А. Д. Гулякова, В. И. Волчихина, В. А. Первуниных. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 64–89.
2. Журавлев, С. П. Построение интеграционных связей в комплексной системе безопасности / С. П. Журавлев, П. П. Журавлев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 116–125.
3. Бабаджанов, Д. А. Виртуальный прибор для систем видеомониторинга / Д. А. Бободжонов, С. В. Волков, В. С. Чапаев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 95–99.
4. Волков, С. В. Система видеомониторинга / С. В. Волков, Р. Р. Рафиков // Труды Междунар. симп. : Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 247–249.
5. Волков, С. В. Принципы построения систем контроля удаленных объектов на базе GSM-канала / С. В. Волков, А. А. Бахмутский, П. А. Сазыкин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2007. – С. 12–14.
6. Волков, С. В. Аппаратный GSM контроль / С. В. Волков, А. А. Бахмутский, П. А. Сазыкин // Новые технологии в образовании, науке и экономике : тр. XVII Междунар. симп. – М. : Инф-изд. центр Фонда поддержки вузов, 2007. – С. 21–27.
7. Измайлов, А. Защита критически важных объектов. Система оценки состояния СФЗ / А. Измайлов, С. Журин // Системы безопасности. – 2012. – № 6. – С. 106–107.
8. Христофоров, А. Безопасный город: специфика, тенденции, перспективы / А. Христофоров // Видеорегистрация. – 2013. – № 1. – С. 24–25.
9. URL: <http://www.vocord.ru/projects/bezopasnyy-gorod-penza/>
10. Система автоматического контроля и управления параметрами объекта / С. В. Волков, А. С. Колдов, О. В. Захарова, В. С. Чапаев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 91–94.
11. GSM-телеметрия / С. В. Волков, М. Ю. Дудоров, А. С. Колдов, В. С. Чапаев // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 57–59.
12. Купцова, Т. Комплексные решения противодействия терроризму на критически важных объектах / Т. Купцова, Д. Севрюков // ОПС. Охранная и охранно-пожарная сигнализация. Периметральные системы. – М., 2013.
13. Система досмотра транспорта Gatekeeper: увидеть то, что скрыто // Системы безопасности. – 2013. – № 4. – С. 94–95.
14. Манг, Н. Камеры Basler scout GigE: надежный контроль железнодорожных путей / Н. Манг // Системы безопасности. – 2013. – № 4. – С. 91.

**Волков Сергей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: sergvv@mail.ru

**Кулапин Валерий Ильич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Светлов Анатолий Вильевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Volkov Sergey Vladimirovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Kulapin Valeriy Il'ich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Svetlov Anatoliy Vil'evich**

doctor of technical sciences, professor,  
head of sub-department of radio engineering  
and radio electronic systems,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Аннотация.** Рассмотрены аспекты построения комплексных систем антитеррористической безопасности. Приведен анализ работы системы «Безопасный город», систем противодействия терроризму на критически важных объектах и транспорте. Рассмотрено построение системной концепции обеспечения безопасности конкретного объекта. Дан анализ применяемых современных комплексных систем антитеррористической безопасности.

**Ключевые слова:** терроризм, антитеррористическая безопасность, система «Безопасный город», критически важный объект.

**Abstract.** The article is considering aspects of creation complex systems for anti-terrorist safety. The analysis of work of «Safe City» system, systems of counteraction to terrorism in crucial objects and transport is given. The construction of safety system concept of a particular object is considered. The analysis of the applied modern complex systems of anti-terrorist safety is given.

**Key words:** terrorism, anti-terrorist safety, «Safe City» system, crucial object.

**УДК 351.75**

**Волков, С. В.**

**Современные технические решения и проблемы в обеспечении комплексной безопасности /**  
С. В. Волков, В. И. Кулапин, А. В. Светлов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 61–68.

## РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОПАСНЫХ И БЕЗОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ ТЕХНОГЕННО-ОПАСНОГО ОБЪЕКТА<sup>1</sup>

Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, И. А. Бабаев

### *Постановка вопроса*

Рассмотрим невосстанавливаемый в процессе эксплуатации технический объект, отказ которого представляет техногенную опасность. Следовательно, вероятность безопасного состояния объекта в момент времени  $t$ , равная  $P_0(t)$ , удовлетворяет следующему соотношению:

$$P_0(t) = P(t), \quad (1)$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы объекта в течение времени  $t$ .

Другими словами, безопасность невосстанавливаемого техногенно-опасного объекта определяется безотказностью, и, значит, ее расчет и оценки следует проводить методами теории надежности.

Рассмотрим теперь восстанавливаемый в процессе эксплуатации объект, отказ и восстановление которого представляют собой техногенную опасность.

Примем следующие допущения:

- будем считать, что восстановление начинается сразу после отказа;
- возможные состояния объекта в произвольный момент времени  $t$  – это опасное или безопасное состояния;
- законы распределения безотказных наработок и процесса восстановления – произвольные, т.е. непараметрические.

Тогда, обозначив вероятность опасного состояния объекта в момент времени  $t$  через  $P_o(t)$ , имеем

$$P_o(t) = 1 - P_0(t). \quad (2)$$

Например, для невосстанавливаемого объекта с учетом формулы (1) получим

$$P_o(t) = F(t),$$

где  $F(t) = 1 - P(t)$  – вероятность отказа объекта в течение времени  $t$ .

В связи с расчетными формулами (1) и (2) возникает задача: найти или оценить вероятность безопасного состояния в момент времени  $t$  для восстанавливаемого техногенно-опасного объекта.

### **1. Формулы для вероятностей опасных и безопасных состояний**

Докажем следующее утверждение:

*Лемма.* Для вероятности безопасного состояния объекта справедлива следующая формула:

$$P_0(t) = P(t)Q(t) \left\{ 1 + \int_0^t \frac{\mu(x)}{P(x)Q(x)} dx \right\}, \quad (3)$$

где  $\mu(x)$  – интенсивность восстановления объекта в момент времени  $x$ ,

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №07-08-00574-а и №10-08-00607-а).

$$Q(t) = \exp\left(-\int_0^t \mu(x) dx\right), \quad (4)$$

– вероятность того, что объект не будет восстановлен в течение времени  $t$ .

*Доказательство.* Согласно определению  $\mu(t)$  – интенсивности восстановления объекта в момент времени  $t$  находим при  $\Delta t \rightarrow 0$  [1]:

$$\Pr((t < \eta < t + \Delta t) | \eta > t) = \mu(t)\Delta t + o(\Delta t),$$

где  $o(\Delta t)$  – бесконечно малая величина; левая часть – эта вероятность того, что время восстановления  $\eta$  будет находиться на временном интервале  $(t, t + \Delta t)$  при условии, что исследуемый объект до момента времени  $t$  после отказа не был восстановлен. Следовательно, вероятность того, что объект будет в момент времени  $t + \Delta t$  находиться в безопасном состоянии при условии, что он в момент времени  $t$  находился в опасном состоянии, согласно теореме умножения независимых событий, равна при  $\Delta t \rightarrow 0$

$$P_1 = P_o(t)[\mu(t)\Delta t + o(\Delta t)]. \quad (5)$$

Точно также, согласно определению  $\lambda(t)$  – интенсивности отказов объекта в момент времени  $t$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ , имеем [2]:

$$\Pr((t < \zeta < t + \Delta t) | \zeta > t) = \lambda(t)\Delta t + o(\Delta t),$$

где левая часть это вероятность того, что время отказа  $\zeta$  будет находиться на временном интервале  $(t, t + \Delta t)$  при условии, что в течение времени  $t$  рассматриваемый объект был безотказен. Откуда находим вероятность того, что объект в момент времени  $t + \Delta t$  будет находиться в безопасном состоянии при условии, что в момент времени  $t$  он находился в этом же состоянии, равна согласно теореме умножения вероятностей следующему выражению:

$$P_2 = P_o(t)[1 - \lambda(t)\Delta t + o(\Delta t)], \quad (6)$$

где квадратная скобка равна согласно определению интенсивности отказов вероятности того, что на интервале времени  $(t, t + \Delta t)$  не будет отказа при  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Применяя теорему сложения вероятностей, определенных соотношениями (5) и (6), найдем

$$P_o(t + \Delta t) = P_o(t)\mu(t)\Delta t + P_o(t)(1 - \lambda(t)\Delta t) + o(\Delta t),$$

откуда с учетом (2), получим

$$\frac{P_o(t + \Delta t) - P_o(t)}{\Delta t} = \mu(t) - (\lambda(t) + \mu(t))P_o(t) + \frac{o(\Delta t)}{\Delta t}.$$

Перейдя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , найдем следующее дифференциальное уравнение:

$$P_o'(t) + (\lambda(t) + \mu(t))P_o(t) = \mu(t). \quad (7)$$

Решая это уравнение при естественном начальном условии

$$P_o(0) = 1,$$

получим искомую формулу (3).

В частности, при  $\mu(t) \equiv 0$  из формулы (3) с помощью (4) следует формула (1). Другими словами, если объект невосстанавливаемый, то вероятность его безопасного состояния в момент времени  $t$  совпадает с вероятностью его безотказной работы в течение времени  $t$ , что уже было отмечено выше.

Для дальнейшего изложения нам понадобится следующее утверждение.

*Следствие 1.* Для вероятности опасного состояния объекта справедлива следующая формула:

$$P_o(t) = P(t)Q(t) \int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)Q(x)} dx. \quad (8)$$

*Доказательство.* Используя формулу (3), согласно (2) имеем

$$P_o(t) = 1 - P(t)Q(t) \left\{ 1 + \int_0^t \frac{\mu(x)}{P(x)Q(x)} dx \right\}. \quad (9)$$

Так как интенсивность восстановления равна [1]

$$\mu(t) = \frac{-Q'(t)}{Q(t)},$$

то

$$\int_0^t \frac{\mu(x)}{P(x)Q(x)} dx = \int_0^t \frac{1}{P(x)} d\left(\frac{1}{Q(x)}\right),$$

откуда имеем

$$\int_0^t \frac{\mu(x)}{P(x)Q(x)} dx = \frac{1}{P(t)Q(t)} - 1 - \int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)Q(x)} dx,$$

где [3]

$$\lambda(x) = \frac{-P'(x)}{P(x)} \quad (10)$$

– интенсивность отказов.

Подставляя полученное выражение в соотношение (9), получим искомую формулу (8).

*Следствие 2.* Функция, определяемая формулой (8), является решением следующего дифференциального уравнения:

$$P_o'(t) + (\lambda(t) + \mu(t))P_o(t) = \lambda(t) \quad (11)$$

при начальном условии

$$P_o(0) = 0.$$

*Следствие 3.* Если  $\lambda(t) \equiv 0$ , то

$$P_o(t) \equiv 0.$$

Другими словами, «абсолютное» отсутствие отказов влечет за собой «идеальную» безопасность, так как согласно (2)

$$P_o(t) \equiv 1.$$

## **2. Непараметрические оценки вероятностей опасных и безопасных состояний**

Справедливо следующее утверждение.

*Теорема 1.* Для вероятности опасного состояния объекта имеет место следующая оценка:

$$P_o(t) \leq 1 - P(t), \quad (12)$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы объекта в течение времени  $t$ .

*Доказательство.* Так как

$$\frac{Q(t)}{Q(x)} \leq 1,$$

где  $0 < x < t$ , то из формулы (8) имеем

$$P_o(t) \leq P(t) \int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)} dx.$$

Учитывая формулу (10), имеем

$$P_o(t) \leq P(t) \int_0^t \frac{-P'(x)}{P^2(x)} dx.$$

Откуда, интегрируя правую часть, получим искомую оценку (12).

*Следствие.* Для вероятности безопасного состояния объекта справедлива следующая оценка:

$$P_o(t) \geq P(t). \quad (13)$$

В частности, из оценок (12) и (13) получим следующие важные для практических приложений оценки:

$$P_o(t_\gamma) \leq 1 - \gamma,$$

$$P_o(t_\gamma) \geq \gamma,$$

где  $t_\gamma = \sup\{t \mid P(t) \geq \gamma\}$  – гамма-процентный ресурс объекта при заданном уровне  $\gamma$ , ( $0 < \gamma < 1$ ) [4].

Заметим, что доказанные оценки этого раздела справедливы для любого закона распределения ресурса.

### **3. Оценки вероятностей опасных и безопасных состояний стареющих объектов**

Будем говорить, что объект стареющий, если его интенсивность отказов (10) как функция времени монотонно растет.

Докажем следующее утверждение.

*Теорема 2.* Для вероятностей опасного и безопасного состояний стареющего объекта справедливы следующие оценки:

$$P_o(t) \leq \frac{t}{r}; \quad P_o(t) \geq 1 - \frac{t}{r}, \quad (14)$$

где  $r$  – средний ресурс, здесь

$$t < r. \quad (15)$$

*Доказательство.* Из формулы (8) с учетом того, что при  $t > x$

$$\frac{P(t)}{P(x)} \leq 1; \quad \frac{Q(t)}{Q(x)} \leq 1,$$

имеем

$$P_o(t) \leq \int_0^t \lambda(x) dx. \quad (16)$$

Так как

$$\int_0^t \lambda(x) dx = -\ln P(t),$$

то, используя следующую оценку для стареющих объектов [3]:

$$P(t) \geq e^{-\frac{t}{r}}, \quad (t < r),$$

получим

$$\int_0^t \lambda(x) \leq \frac{t}{r}.$$

Учитывая это в соотношении (16), найдем оценки (14).

#### 4. Оценки вероятностей опасных и безопасных состояний интенсивно восстанавливаемых стареющих объектов

Будем считать, что объект интенсивно восстанавливается, если его интенсивность восстановления  $\mu(t)$  как функция времени  $t$  монотонно растёт.

Для таких объектов можно избавиться от ограничения (15), доказав следующее утверждение.

*Теорема 3.* Для вероятностей опасного и безопасного состояний интенсивно восстанавливаемых стареющих объектов справедливы следующие оценки:

$$P_o(t) \leq t\lambda(t) \frac{1 - P(t)Q(t)}{-\ln(P(t)Q(t))}; \quad (17)$$

$$P_b(t) \geq 1 - t\lambda(t) \frac{1 - P(t)Q(t)}{-\ln(P(t)Q(t))}. \quad (18)$$

*Доказательство.* Для интенсивно восстанавливаемых стареющих объектов справедливы следующие оценки при  $x < t$  [5]:

$$P(x) \geq P(t)^{\frac{x}{t}}; \quad Q(x) \geq Q(t)^{\frac{x}{t}}.$$

Учитывая эти оценки и то, что при  $x < t$

$$\lambda(x) \leq \lambda(t),$$

из формулы (8), получим

$$P_o(t) \leq P(t)Q(t)\lambda(t) \int_0^t (P(t)Q(t))^{-\frac{x}{t}} dx. \quad (19)$$

Так как

$$\int_0^t (P(t)Q(t))^{-\frac{x}{t}} dx = t \frac{(P(t)Q(t))^{-1} - 1}{-\ln(P(t)Q(t))},$$

то из (19) найдем искомые оценки (17) и (18).

Теперь покажем, что оценки (17) и (18) достижимы, т.е. существует такой закон распределения безотказных наработок и такой закон времени восстановления, для которых правые и левые части оценок (17) и (18) равны.

Для этой цели положим вероятность безотказной работы объекта, равной

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (20)$$

а вероятность восстановления, равной

$$Q(t) = \exp(-\mu t), \quad (21)$$

где  $\lambda > 0$  и  $\mu > 0$  – постоянные интенсивности отказов и восстановления соответственно. Тогда согласно оценке (18) имеем

$$P_6(t) \geq 1 - t\lambda \frac{1 - e^{-(\lambda+\mu)t}}{(\lambda+\mu)t},$$

откуда получим

$$P_6(t) \geq \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t}. \quad (22)$$

Рассчитаем левую часть (22), используя формулу (3) и условия (20) и (21). Имеем

$$P_6(t) = e^{-(\lambda+\mu)t} \left[ 1 + \mu \int_0^t e^{(\lambda+\mu)x} dx \right].$$

После несложных выкладок получим:

$$P_6(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t}, \quad (23)$$

откуда видно, что правые части (22) и (23) равны. Следовательно, оценка (18) достижима. Точно также доказывается достижимость оценки (17).

### 5. Предельные оценки вероятностей безопасного и опасного состояний

Докажем следующее утверждение.

*Теорема 4.* Пусть интенсивности отказов и восстановления имеют следующие пределы:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \Lambda; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) = M. \quad (24)$$

Тогда справедливы следующие предельные стационарные значения оценок вероятностей безопасного и опасного состояний стареющего объекта:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_6(t) = K_\Gamma; \quad (25)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = K_\Pi, \quad (26)$$

где

$$K_\Gamma = \frac{M}{\Lambda + M}; \quad K_\Pi = \frac{\Lambda}{\Lambda + M},$$

соответственно коэффициенты готовности и простоя объекта.

*Доказательство.* Для доказательства воспользуемся формулой (8) и покажем, что правая часть ее есть неопределенность вида  $\frac{\infty}{\infty}$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Так как  $Q(x) \leq 1$ , то

$$\int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)Q(x)} dx \geq \int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)} dx.$$

Используя формулу (10), получим

$$\int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)Q(x)} dx \geq \int_0^t d\left(\frac{1}{P(x)}\right),$$

откуда имеем

$$\int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)Q(x)} dx \geq \frac{1}{P(t)} - 1.$$

Видно, что при  $t \rightarrow \infty$

$$\int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(x)Q(x)} dx \rightarrow \infty.$$

Следовательно, правая часть (8) есть неопределенность вида  $\frac{\infty}{\infty}$ .

Раскрывая эту неопределенность по правилу Лопиталя, имеем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} \left( \int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(t)Q(t)} dx \right)'}{\lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{P(t)Q(t)} \right)'}$$

Так как правая часть равна

$$\frac{\lim_{t \rightarrow \infty} \left( \int_0^t \frac{\lambda(x)}{P(t)Q(t)} dx \right)'}{\lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{P(t)Q(t)} \right)' } = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\lambda(t)}{P(t)Q(t)}}{\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{-P'(t)Q(t) - P(t)Q'(t)}{(P(t)Q(t))^2}},$$

то, используя формулу (10) и формулу

$$\mu(t) = \frac{-Q'(t)}{Q(t)},$$

получим

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t)}{\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) + \lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t)}.$$

Отсюда с учетом формулы (24) найдем искомый предел (25).

Для доказательства предела (26) воспользуемся формулами (2) и (25). Тогда

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = 1 - \frac{\Lambda}{\Lambda + M},$$

что и доказывает (26).

### Заключение

В предложенной статье доказаны формулы для расчета вероятностей безопасного и опасного состояний восстанавливаемого объекта через вероятности безотказной работы и восстановления.

Для вероятностей безопасного и опасного состояний стареющих и интенсивно восстанавливаемых объектов установлены соответственно нижние и верхние гарантированные непараметрические оценки.

Для оценок вероятностей безопасного и опасного состояний стареющего объекта, отказ и восстановления которого представляют техногенную опасность, доказаны предельные стацио-

нарные значения, равные соответственно коэффициенту готовности и коэффициенту простоя объекта в процессе эксплуатации.

Отметим также, что настоящая статья является продолжением работ, опубликованных в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе и в изданиях NASA [6–17].

### Список литературы

1. Кокс, Д. Р. Теория восстановления / Д. Р. Кокс, В. Л. Смит. – М. : Советское радио, 1967. – 299 с.
2. Барлоу, Р. Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М. : Сов. радио, 1969. – 488 с.
3. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
4. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 32 с.
5. Садыхов, Г. С. Методы и модели оценок безопасности сверхназначенных сроков эксплуатации технических объектов / Г. С. Садыхов, В. И. Кузнецов. – М. : ЛКИ, 2007. – 144 с.
6. Садыхов, Г. С. Критерии оценок безопасной эксплуатации объектов / Г. С. Садыхов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 1. – С. 119–122.
7. A Nonparametric Method for Estimation of the Lower Confidence Limit of the Mean Residual Life of Equipment Items / G. S. Sadykhov, V. P. Savchenko, H. R. Fedorchuk, Ju. V. Gulyayev // The Smithsonian / NASA Astrophysics Data System, Physics-Doklady. – 1995. – V. 40, Issue 7. – July. – P. 343–345.
8. Sadykhov, G. S. Dependence of the Operating-Life Index on the Characteristics of Life-Reserve Spending / G. S. Sadykhov, V. P. Savchenko // The Smithsonian / NASA Astrophysics Data System, Physics-Doklady. – 1998. – V. 43, Issue 7. – July. – P. 412–414.
9. Садыхов, Г. С. Оценка условного распределения отказов в пуассоновском потоке через биномиальный закон / Г. С. Садыхов, И. А. Бабаев // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2013. – № 8. – С. 143–150.
10. Садыхов, Г. С. Оценка длительности безопасной эксплуатации и допустимого числа срабатываний свыше назначенных уровней для стареющих техногенно-опасных объектов / Г. С. Садыхов, Самер Алшехаби // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 3. – С. 120–126.
11. Садыхов, Г. С. Непараметрические и предельные оценки длительности безопасного срока эксплуатации техногенно-опасных объектов / Г. С. Садыхов, О. В. Некрасова // Труды института системного анализа РАН. – 2010. – Т. 53. – С. 191–198.
12. Садыхов, Г. С. Расчет показателей безопасности эксплуатации подсистемы с параллельно нагруженными элементами в составе техногенно-опасного объекта / Г. С. Садыхов, О. В. Некрасова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 1. – С. 107–113.
13. Sadykhov, G. S. Estimation of the Residual Life for Items of Equipment, Based on a Physical Model of Additive Accumulation of Damages / G. S. Sadykhov, V. P. Savchenko, Ju. V. Gulyayev // The Smithsonian / NASA Astrophysics Data System, Physics-Doklady. – 1995. – V. 40, Issue 8. – August. – P. 397–400.
14. Садыхов, Г. С. Расчет показателей контроля технического состояния техногенно-опасного объекта / Г. С. Садыхов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 4. – С. 120–126.
15. Sadykhov, G. S. Technical condition control calculation for hazardous industrial facilities / G. S. Sadykhov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – V. 43, Issue 4. – July. – P. 327–332.
16. Садыхов, Г. С. К проблеме оценки средней наработки до критического отказа техногенно-опасного объекта / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 59–61.
17. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 74–79.

#### **Садыхов Гулам Садыхович**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
действительный член  
Академии проблем качества РФ,  
Московский государственный  
технический университет им. Н. Э. Баумана  
(105005, Россия, г. Москва,  
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)  
E-mail: gsadykhov@gmail.com

#### **Sadykhov Gulam Sadykhovich**

doctor of technical science, professor,  
senior researcher manager,  
fellow of Russian Federation Quality Problems academy  
Moscow State Technical University  
named after N. E. Bauman  
(105005, 2-ya Baumanskaya street, apartment 5, page 1,  
Moscow, Russia)

**Савченко Владимир Петрович**

доктор технических наук, профессор,  
генеральный директор,  
Радиотехнический институт  
им. академика Л. А. Минца  
(127083, Россия, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1)  
E-mail: savchenko@rti-mints.ru

**Бабаев Ислам Акмурадович**

инженер,  
ОАО «Радиофизика»  
(125480, Россия, г. Москва,  
ул. Героев Панфиловцев, д. 10)  
E-mail: sleavik@gmail.com

**Аннотация.** Устанавливаются непараметрические гарантированные оценки для вероятностей опасного и безопасного состояния объектов, отказ и восстановление которых в процессе эксплуатации представляют техногенную опасность. Также в статье доказаны оценки вероятностей опасного и безопасного состояния в случае стареющих восстанавливаемых объектов и приведены предельные стационарные значения оценок этих вероятностей.

**Ключевые слова:** непараметрическая оценка, опасное состояние, безопасное состояние, стареющий объект, восстанавливаемый объект.

УДК 629.039.58

Садыхов, Г. С.

Расчет и оценка вероятностей опасных и безопасных состояний техногенно-опасного объекта / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, И. А. Бабаев // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 69–77.

**Savchenko Vladimir Petrovich**

doctor of technical science, professor,  
general manager,  
Radiotechnical Institute  
named after academician A. L. Mints  
(127083, p.1, 10 8 March street, Moscow, Russia)

**Babaev Islam Akmuradovich**

engineer,  
Joint Stock Company «Radiofizika»  
(125480, 10 Geroev Panfilovtsev street, Moscow Russia)

**Abstract.** In this paper we consider nonparametric guaranteed estimates of safe and unsafe states probabilities for objects which failure and recovery during their operation are technogenically hazardous. This paper also reviews estimates of safe and unsafe states probabilities and their limit stationary values for aging restorable units.

**Key words:** nonparametric estimate, safe state, unsafe state, aging unit, restorable unit.

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 681.324

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ГАЗА ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ НИТЕЙ, ГРУППИРОВАННЫХ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ В ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В. К. Дедков

### *Введение*

Для надежной и эффективной работы магистральных газопроводов (МГ) необходимо обеспечить постоянный контроль параметров движения газа в изотермическом режиме и в режиме с учетом теплообмена с окружающей средой, что может быть выполнено различными способами. Одним из эффективных способов является применение методов математического моделирования, которые позволяют получить решения соответствующих задач численным и аналитическими способами.

Воздействие теплообмена на движение газа в трубопроводе может быть различным в зависимости от его расположения (надземная и подземная укладка, проход через реку и т.д.), а также от климатических условий. Кроме того, на изменение теплового режима течения газа по надземным газопроводам влияют солнечная радиация, скорость и направление ветра, ориентация газопровода на местности, температура грунта и воздуха и т.д.

Для увеличения пропускной способности и надежности функционирования конкретного участка магистрали прокладываются параллельные нити с общими входами и выходами [1, 2].

### *Разработка модели*

Падение давления на элементарном участке горизонтального газопровода длиной  $L$  при пренебрежении силой инерции газа определяется по формуле

$$P_H^2 - P_K^2 = \frac{\lambda ZRT}{DF^2} LM^2,$$

здесь  $P_H$ ,  $P_K$  – значения давления в начале и конце участка;  $Z$  – коэффициент сжимаемости газа;  $R$  – приведенная газовая постоянная транспортируемого газа;  $T$  – постоянная (или средняя) температура газа на участке;  $D$  – внутренний диаметр газопровода;  $F = \pi D^2 / 4$  – площадь поперечного сечения газопровода;  $M$  – массовый расход газа.

Переход к коммерческому расходу  $Q$  осуществляется через формулу

$$Q = \frac{M}{\rho_{ст}} = \frac{RT_{ст}}{P_{ст}} M,$$

где  $T_{ст}$  и  $P_{ст}$  – стандартные температура и давление.

Ограничимся рассмотрением элементарного участка МГ, где установился развитый режим турбулентного течения. Поэтому коэффициент сопротивления трения  $\lambda$  принимается постоянным, например, по эмпирической формуле [3]

$$\lambda = 0,11(k/D)^{0,25}.$$

Если участок состоит из  $n$  одинаковых параллельных труб с сообщающимися концами, то на основе аналогов закона Кирхгофа можно доказать, что для участка устанавливается одинаковый расход газа по параллельным нитям:  $M_i = M/n$ . В связи с этим на данном конце участка значение давления газа определяется в виде

$$P_K = \sqrt{P_H^2 - \frac{\lambda ZRTL}{DF^2} \left(\frac{M}{n}\right)^2}.$$

Если  $n_1$  параллельные трубы имеют одинаковые гидравлические показатели ( $D_1$  и  $k_1$ ), а остальные  $n_2$  параллельные трубы – отличающиеся от них показатели  $D_2$  и  $k_2$ , то через трубы с одинаковыми показателями проходит одинаковый расход и получается зависимость

$$M = n_1 M_1 + n_2 M_2,$$

где  $M_1$  – массовый расход газа по трубе из первой группы, а  $M_2$  – по трубе из второй группы.

Согласно аналогу первого закона Кирхгофа

$$P_{1K} = P_{2K},$$

т.е. на конце участка в обеих группах труб достигается одинаковое давление. Тогда в первой части (1), составленной для труб двух групп, имеются одинаковые выражения. Соответственно правые части формул должны иметь одинаковые значения. В связи с этим для  $M_1$  и  $M_2$  получаем второе уравнение:

$$\frac{\lambda_1 ZRT}{D_1 F_1^2} L M_1^2 = \frac{\lambda_2 ZRT}{D_2 F_2^2} L M_2^2.$$

Отсюда с учетом принятого выражения коэффициента сопротивления имеем

$$\frac{k_1^{1/4}}{D_1^{21/4}} M_1^2 = \frac{k_2^{1/4}}{D_2^{21/4}} M_2^2$$

или с учетом значения  $M_2 = \frac{M - n_1 M_1}{n_2}$

$$\frac{k_1^{1/8}}{D_1^{21/8}} M_1 = \frac{k_2^{1/8}}{D_2^{21/8}} \frac{M - n_1 M_1}{n_2}.$$

Поэтому по трубе первой группы массовый расход газа составляет

$$M_1 = \frac{M}{n_1 + n_2 \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{1/8} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{21/8}}.$$

Соответственно через трубы второй группы расход газа составляет

$$M_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{1/8} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{21/8} M_1.$$

Положим, что параллельные нити имеют три группы показателей:  $D_1, k_1$ ;  $D_2, k_2$  и  $D_3, k_3$ . В каждой группе по  $n_1, n_2$  и  $n_3$  труб. Распределение расхода газа подчиняется зависимости

$$M = n_1 M_1 + n_2 M_2 + n_3 M_3,$$

где  $M_1, M_2$  и  $M_3$  – соответственно расходы газа по отдельным нитям 1-й, 2-й и 3-й групп. Приведя значения давления на конце элементарного участка, получаем зависимости

$$\frac{k_1^{1/8}}{D_1^{21/8}} M_1 = \frac{k_2^{1/8}}{D_2^{21/8}} M_2 = \frac{k_3^{1/8}}{D_3^{21/8}} M_3.$$

Совместное решение последних уравнений позволяет получить зависимости

$$M_1 = \frac{M}{n_1 + n_2 \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{1/8} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{21/8} + n_3 \left(\frac{k_1}{k_3}\right)^{1/8} \left(\frac{D_3}{D_1}\right)^{21/8}},$$

$$M_2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{1/8} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{21/8} M_1,$$

$$M_3 = \left(\frac{k_1}{k_3}\right)^{1/8} \left(\frac{D_3}{D_1}\right)^{21/8} M_1.$$

Рассуждая аналогичным образом для  $m$  групп труб, получаем формулы

$$M_1 = \frac{M}{\sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{k_1}{k_i}\right)^{1/8} \left(\frac{D_i}{D_1}\right)^{21/8}},$$

$$M_i = \left(\frac{k_1}{k_i}\right)^{1/8} \left(\frac{D_i}{D_1}\right)^{21/8} M_1.$$

Таким образом, получены формулы для гидравлического расчета участка с  $n$  группами параллельных нитей в изотермическом режиме. Преимущество предложенного нами способа выражается в том, что, группируя трубы по гидравлическим показателям, достигается сокращение объема вычислений. Например, если участок состоит из четырех параллельных нитей с одинаковыми гидравлическими показателями, то по методике коэффициента расхода вычисления ведутся по каждой нити в отдельности. В то же время по предлагаемому варианту вычисления проводятся только один раз – для единой группы [4, 5].

Следовательно, если для отдельной параллельной нити с показателями  $D$  и  $k$  коэффициент расхода составляет

$$k_p = \left(\frac{D}{D_0}\right)^{21/8} \left(\frac{k_0}{k}\right)^{1/8},$$

где  $D_0$  и  $k_0$  – показатели эталонного МГ, то для  $N$  параллельных нитей имеет место

$$k_p = \sum_{j=1}^N k_{pj},$$

и для участка с длиной  $L$  имеем обычную формулу

$$p_H^2 - p_K^2 = BQ^2 \frac{\lambda_0 L}{D_0^5 k_p^2}.$$

Соответственно для случая с введением групп коэффициент расхода имеет значение

$$k_p = \sum_{i=1}^N n_i k_{pi}.$$

Таким образом, получено аналитическое выражение, позволяющее оценить показатели магистрального газопровода и по ним оценить качество происходящих процессов.

### Выводы

В результате реализации приведенной выше модели было установлено, использование группового подхода позволило сократить объем вычислений при наличии параллельных нитей с одинаковыми гидравлическими показателями, так как в предложенной модели выполняются условия как аналогов законов Кирхгофа [3].

### Список литературы

1. Бордюгов, Г. А. Фигуривные потери природного газа / Г. А. Бордюгов, А. А. Апостолов, А. Г. Бордюгов // Газовая промышленность. – 1997. – № 10. – С. 45–56.
2. Козаченко, А. Н. Основы эксплуатации газотурбинных установок на магистральных газопроводах : учеб. пособие / А. Н. Козаченко. – М. : ГАНГ им. И. М. Губкина, 1993. – 139 с.
3. Козаченко, А. Н. Основы ресурсоэнергосберегающих технологий трубопроводного транспорта природных газов : учеб. пособие / А. Н. Козаченко, В. И. Никишин. – М. : ГАНГ им. И. М. Губкина, 1993. – 234 с.
4. Аналитическая оценка качества технических средств лазерно-информационной системы мониторинга объектов газотранспортной сети / И. И. Плюсин, К. И. Бушмелева, С. У. Увайсов, П. Е. Бушмелев, Е. В. Назаров // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 69–75.
5. Влияние метеоданных при проектировании распределенной системы мониторинга газопроводов на основе беспроводных модулей / К. И. Бушмелева, Э. Л. Гуревич, П. Е. Бушмелев, И. И. Плюсин, С. У. Увайсов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 14–16.

#### **Штыков Роман Александрович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра физики и прикладной математики,  
Муромский институт  
Владимирского государственного университета  
(600256, Россия, г. Муром, Владимирская область,  
ул. Ленина, 115–172)  
8(49234)2-29-42  
8-920-622-20-22  
E-mail: ipmroman@yandex.ru

**Аннотация.** Для увеличения пропускной способности и надежности функционирования конкретного участка магистрали прокладываются параллельные нитки с общими входами и выходами. Приводится методика определения гидравлических параметров движения газа по магистрали в изотермическом режиме и в режиме с учетом теплообмена с окружающей средой. Показано, что использование группового подхода позволило сократить объем вычислений при наличии параллельных нитей с одинаковыми гидравлическими показателями.

**Ключевые слова:** газопроводная сеть, газ, магистраль, модель.

#### **Shtykov Roman Aleksandrovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of physics and applied mathematics,  
Murom Institute of Vladimir State University  
(600256, 115–172 Lenin street, Murom,  
Vladimir Oblast, Russia)

**Abstract.** In order to increase the capacity and reliability of the operation of a particular plot line-parallel threads with shared inputs and outputs. The technique of definition of hydraulic parameters of gas line insulated and in view of the heat exchange with the environment. It is shown that the use of the cluster approach has reduced the volume of calculations with parallel threads with the same hydraulic performance.

**Key words:** gas pipeline network, gas, highway, model.

**УДК 681.324**

***Штыков, Р. А.***

**Перераспределение расхода газа для параллельных нитей, группированных по гидравлическим показателям в изотермическом режиме / Р. А. Штыков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 78–82.**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д. А. Голушко

## Введение

В настоящее время к параметрам надежности изделий военного назначения (ИВН) предъявляются высочайшие требования. Поэтому в процессе разработки и производства все технические системы (ТС) ИВН подвергаются различным видам испытаний на воздействие внешних факторов (ВВФ) в соответствии с требованиями российских комплексов государственных военных стандартов «Мороз-6» и «Климат-7».

Механические воздействия являются одним из важнейших дестабилизирующих факторов, приводящих к отказам изделий. По данным стендовых испытаний космического корабля «Аполлон», 43,8 % отказов вызваны вибрационными воздействиями, 4 % – ударными, 0,1 % – статическими силовыми воздействиями при ротационных испытаниях [1]. В связи с этим предусматривается обязательное проведение лабораторно-стендовых испытаний на воздействие вибрации с помощью специальных методов и средств испытаний, одним из главных основополагающих принципов которых является принцип эквивалентности испытательных режимов режимам эксплуатации [2].

### 1. Организация эксперимента по исследованию частотного спектра механических колебаний сложных технических систем

Для получения информации о воздействии вибрации в процессе испытаний используют виброизмерительные преобразователи (ВИП), размещаемые в контрольных точках (КТ). Сигнал с ВИП в КТ используется в системе управления, обеспечивающей стабилизацию передаточной функции вибратора. КТ располагается на поверхности объекта испытания. Задание ускоренного движения для одной КТ достаточно в случае прямолинейной траектории движения контура крепления ТС как абсолютно твердого тела. Однако в большинстве случаев движение не является прямолинейным. Поэтому вибрационные воздействия, передаваемые в ИВН от контура крепления ИИ, необходимо делить на две составляющие: инерционное воздействие, характеризующее движение контура с ИВН как целого (абсолютно твердого тела), и деформационное воздействие, возникающее вследствие упругих деформаций контура.

При одинаковых уровнях виброускорений в КТ движения точек крепления при инерционном и деформационном воздействии существенно различны. В верхнем поддиапазоне появляются новые динамические явления, связанные с упругими деформациями контура крепления ТС. В этом случае, кроме инерциального воздействия, ТС подвергается деформационному воздействию, при котором точки крепления могут совершать противофазные упругие перемещения [1, 3].

Для исследования деформационного воздействия необходимо предварительно определить рабочий частотный диапазон объекта оснащения испытуемого изделия. Исследование спектра частот колебаний ИВН на гусеничных шасси и влияния деформационной составляющей проводилось на ЭВМ с использованием акселерометра ADXL321 (рис. 1).

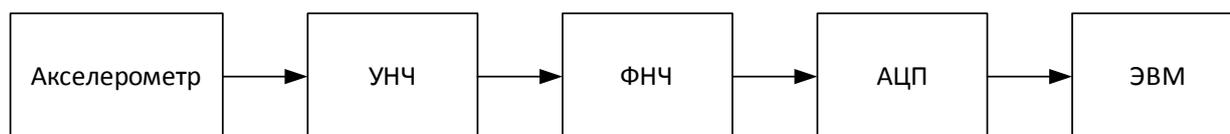


Рис. 1. Структурная схема для исследования акселерограмм

Акселерометр ADXL321 имеет полосу частот от 0,5 Гц до 2,5 кГц, поэтому диапазон сигнала ограничен ФНЧ Бесселя 6-го порядка с частотой среза 2,5 кГц. УНЧ используется для согласования уровней акселерометра и АЦП АК5385А.

## 2. Исследование верхнего диапазона частотного спектра

Измерение проводилось в крепежной бонке изделия на базе БМП-3 в движении по грунтовой дороге в течение 10 мин. На рис. 2 представлен измеренный спектр частот при использовании оконной функции Хамминга.

Согласно ГОСТ 306.1.1–99 испытания методом 100–1 проводят в диапазоне частот  $0,2f_{кр} - 1,5f_{кр}$ , но не выше 20 кГц, где  $f_{кр}$  – критическая частота изделия. Критическая частота – частота, на которой в зависимости от уровня вибрации появляется эффект неправильного функционирования образца или ухудшение его эксплуатационных характеристик или наблюдаются механические резонансы или другие эффекты, связанные с вибрацией, например дребезжание [4].

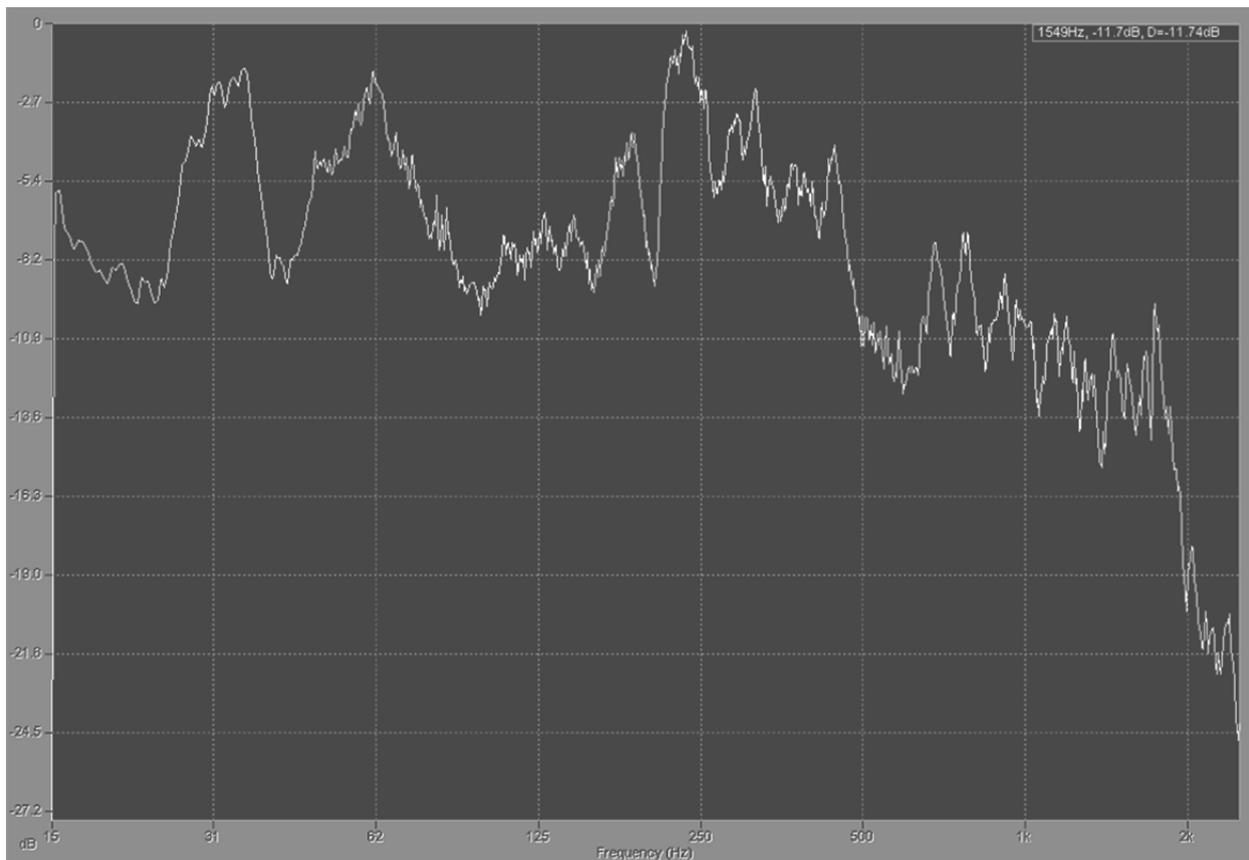


Рис. 2. Спектр частот колебаний технических средств военного назначения на гусеничных шасси

При проведении испытаний методом 100–4 верхняя граничная частота ограничена 2000 Гц. На рис. 2 показан рабочий диапазон вибраций объекта оснащения, который согласно принципу максимальной эквивалентности испытательных режимов должен соответствовать диапазону частот испытаний. Таким образом, целесообразно ограничить частотный диапазон исследования деформационной составляющей реальной акселерограммы двух точек крепления частотой 2 кГц. На рис. 3 и 4 представлены акселерограммы, измеренные двумя датчиками, закрепленными на крепежных бонках, расположенных на расстоянии 8 и 26 см соответственно.

На рис. 3 видно, что сигналы практически идентичны, в то время как на рис. 4 наблюдаются участки с противофазным движением точек крепления (5.14.387 – 5.14.388), что указывает на наличие деформационной составляющей вибрационного воздействия.

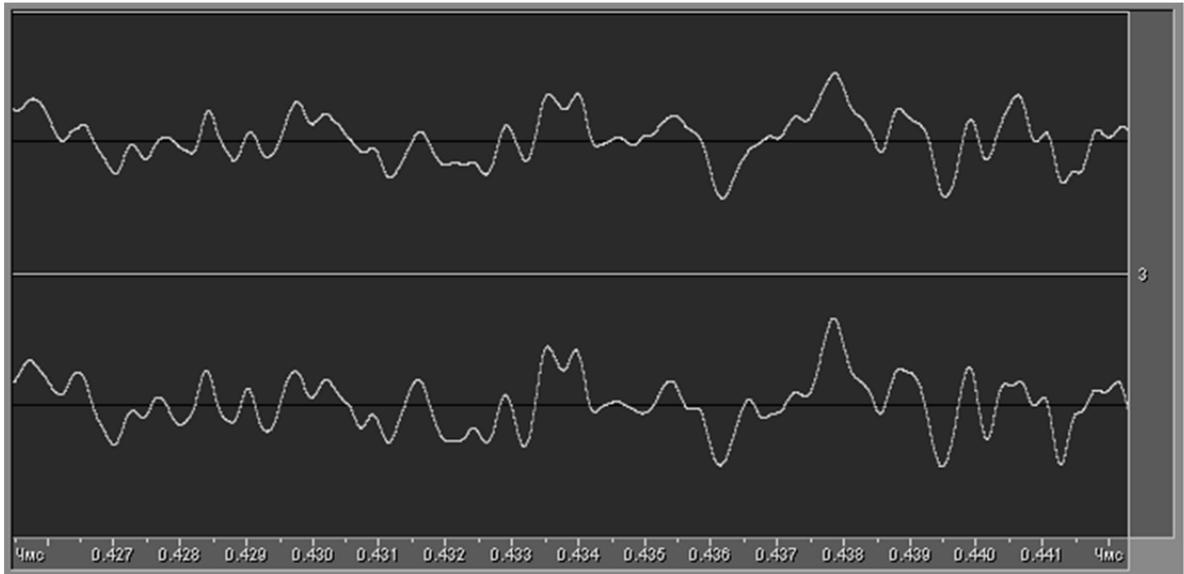


Рис. 3. Акселерограммы двух точек крепления на расстоянии 8 см

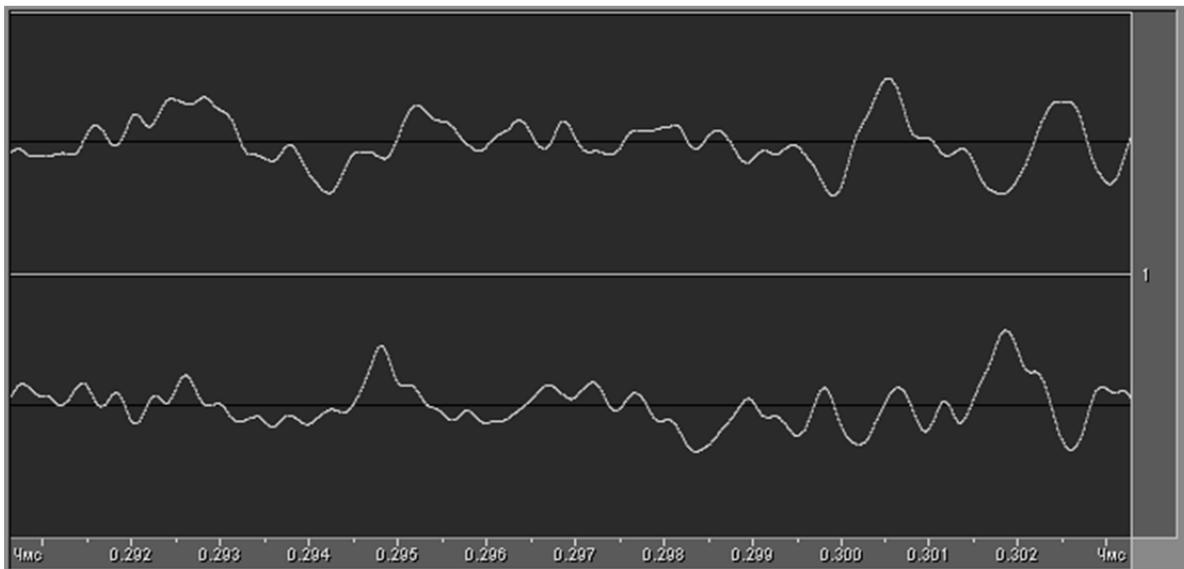


Рис. 4. Акселерограммы двух точек крепления на расстоянии 26 см

### ***3. Исследование верхнего диапазона частотного спектра***

При воздействии удаленного источника вибрации на исследуемый объект посредством крепежных элементов разность фаз в двух противоположных точках крепления на частоте 2 кГц может достигать  $90^\circ$  [3, 5, 6]. К верхнему поддиапазону относится та часть рабочего диапазона вибрации (5–2000 Гц), в которой упругие смещения контура крепления ТС имеют тот же порядок, что и амплитуды возбуждаемой вибрации [1]. Однако результаты проведенного эксперимента указывают на то, что даже на частоте 500 Гц являются существенными смещения, вызванные динамическими деформациями контура крепления ТС. На рис. 5 показаны акселерограммы двух точек крепления на расстоянии 26 см после обработки цифровым фильтром НЧ с частотой среза 500 Гц.

Если среда распространения вибрации не однородна, а представляет собой составную конструкцию, в которой стыкуемые поверхности соприкасаются друг с другом под разными углами, источников вибрации несколько (гусеницы, двигатель, трансмиссия) и направления распространения волн от них различны – в отдельные моменты времени точки крепления могут перемещаться противофазно даже в низкочастотном поддиапазоне.

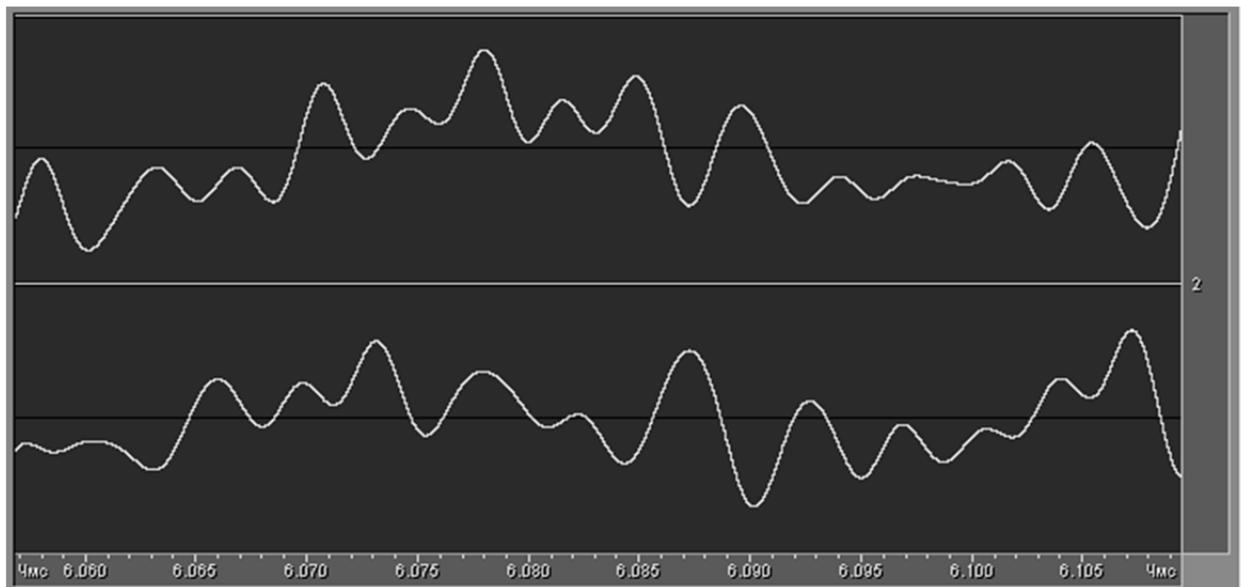


Рис. 5. Акселерограммы после обработки цифровым фильтром

### **Выводы**

Таким образом, результаты экспериментального исследования деформационной составляющей вибрации, измеренной в крепежных бонках ИВН, показали, что динамические деформации оказывают воздействие не только в верхнем поддиапазоне. Кроме того, пренебрежение деформационной составляющей вибрации приводит к существенным искажениям действительной картины динамического нагружения ТС.

### **Список литературы**

1. Остроменский, П. И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов / П. И. Остроменский. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 173 с.
2. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 104–106.
3. Затылкин, А. В. Исследование влияния деформационной составляющей внешнего вибрационного воздействия на надежность радиоэлектронных средств / А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, Д. А. Рындин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 42–43.
4. ГОСТ 30630.1.8-2002 (МЭК 60068-2-57:1989) Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации с воспроизведением заданной акселерограммы процесса.
5. Таньков, Г. В. Исследование моделей стержневых конструкций радиоэлектронных средств / Г. В. Таньков, В. А. Трусов, А. В. Затылкин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2005. – Т. 1. – С. 156–158.
6. Затылкин, А. В. Алгоритмическое и программное обеспечение расчета параметров статически неопределимых систем амортизации РЭС / А. В. Затылкин, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 47–62.

**Голушко Дмитрий Александрович**

аспирант,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
8-(412)-36-82-12  
E-mail: oldalez@yandex.ru.

**Golushko Dmitriy Aleksandrovich**

postgraduate student,  
sub-department of radio equipment  
design and production,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Аннотация.** Приведены результаты эксперимента по выявлению характера вибрационного воздействия на технические системы объектов военного назначения, установленных на гусеничные шасси. Проведен анализ колебательных процессов технических систем в условиях внешних динамических воздействий в нижней и верхней части рабочего диапазона. На основе полученных результатов сделан вывод о необходимости развития существующих методов исследования вибрации и методов проведения испытаний технических систем на виброустойчивость и вибропрочность.

**Ключевые слова:** вибрация, деформационная составляющая, фазовый сдвиг, электронные средства, испытания.

**Abstract.** This article presents the results of an experiment to identify the nature of the interventions on the technical system of military facilities installed on crawler. The analysis of oscillatory processes of technical systems under external dynamic effects in the lower and upper part of the operating range. On the basis of the results concluded that the need for the development of existing research methods and techniques of vibration testing of technical systems for the vibration and vibration.

**Key words:** vibration, deformation component, phase shift, electronic tools, test.

УДК 62.1-9

Голушко, Д. А.

**Исследование частотного спектра механических колебаний сложных технических систем подвижных объектов / Д. А. Голушко // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 83–87.**

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ ФАЗ ВНЕШНЕГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, О. Н. Герасимов

### *Введение*

Одним из главных, основополагающих принципов испытаний технических систем (ТС) является принцип эквивалентности испытательных режимов режимам эксплуатации. Несмотря на значительные достижения в области стендовых испытаний, надежность функционирования ТС в реальных условиях эксплуатации во многом не удовлетворяет современным требованиям [1, 2]. По оценкам специалистов до 50 % отказов ТС вызвано несоответствием стендовых испытаний и реальных условий эксплуатации [3, 4].

Поэтому в общей проблеме повышения надежности ТС задача разработки новых методов и средств повышения эффективности стендовых испытаний является актуальной. В связи с этим необходимо провести анализ распространения стоячих волн в одномерных (стержни) и двумерных (пластины) элементах, к набору которых можно свести любую конструкцию ТС.

### *1. Модель распространения стоячих волн в упругой пластине с конечными размерами*

В любой упругой пластине конечных размеров на резонансных частотах возникают стоячие волны, т.е. такие колебания, при которых все точки колеблются с одной частотой и в одной фазе [5].

Типы возможных стоячих волн пластины зависят от ее геометрической формы, скорости распространения волн в материале пластины и граничных условий: края пластинки могут быть закреплены, могут быть свободны. В первом случае на границе будут располагаться узлы стоячей волны, во втором – пучности.

Для проведения анализа возникновения стоячих волн в пластине выберем в качестве граничных условий крепления четыре точки, находящиеся в углах пластины (что соответствует практической задаче крепления печатного узла в корпусе ТС). Если задать декартовую систему координат, так, чтобы ее оси совпадали с краями пластинки (рис. 1), то функции, описывающие колебания пластинки, имеют вид

$$U(x, y, t) = A[\sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(\omega t)], \quad (1)$$

где  $k_x, k_y$  – волновые числа, значения которых определяются граничными условиями.

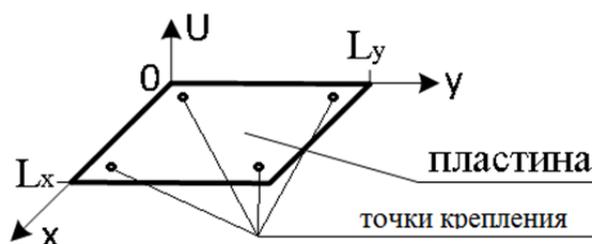


Рис. 1. Геометрическая модель пластины

Так как углы пластинки закреплены, то ее возмущения должны обращаться в нуль: при  $x = 0, y = 0; y = L_y; x = L_x$ , что выполняется автоматически; при  $x = L_x, y = L_y$  ( $L_x, L_y$  – длины сторон пластины, направленных вдоль оси  $Ox$  и  $Oy$  соответственно). Последнее условие накладывает ограничения на возможные значения параметра  $k_x$ , так как для его удовлетворения следует положить

$$k_x L_x = jx\pi, \quad (2)$$

где  $j = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Следовательно, волновое число  $k_x$  при вхождении пластины в резонанс может принимать значения

$$k_x = jx\pi L_x.$$

Аналогичные рассуждения (2) приводят к следующим значениям волнового числа  $k_y$

$$k_y = jy\pi L_y.$$

Таким образом, форма собственных колебаний пластины на резонансных частотах определяется двумя целыми числами  $j_x, j_y$ , каждое из которых равно числу пучностей волны вдоль соответствующих сторон пластинки.

### 2. Анализ собственных форм пластины при синфазном воздействии

На основе проведенных рассуждений в прямоугольной пластине с четырьмя точками крепления построены два возможных типа стоячей волны с различными значениями параметров  $k_x$  и  $k_y$  (рис. 2). Воздействие в точках крепления синфазное.

Поскольку при возникновении резонанса фаза колебаний точки на поверхности волны (в центре пучности) отстает от возбуждающего воздействия на  $90^\circ$ , то направление движения точек крепления показано (стрелками) противоположно форме ближайшей пучности.

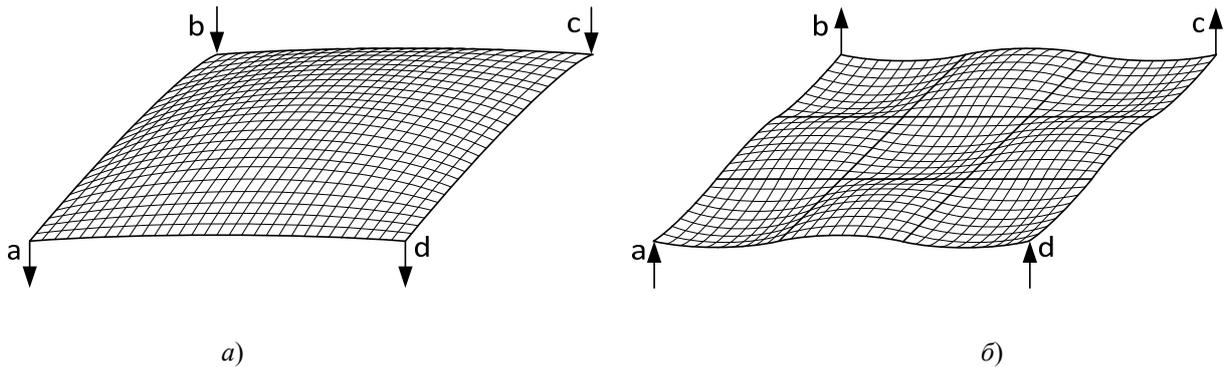


Рис. 2. Формы собственных колебаний пластины на первой резонансной частоте:  
 $a - j_x = 1, j_y = 1$ ;  $b - j_x = 3, j_y = 3$

Понятно, что формы собственных колебаний пластины на других резонансных частотах так же зависят от этих двух целочисленных параметров  $-j_x$  и  $j_y$  (рис. 3). Жирными линиями показаны узловые линии.

Возбуждение таких асимметричных форм собственных колебаний при синфазном вибрационном воздействии в точки крепления невозможно. При этом следует учитывать, что когда амплитуда стоячей волны максимальна (фаза равна  $90^\circ$ ), а направление движения меняет знак на противоположный, фаза возбуждающих колебаний уже равна  $180^\circ$  и направление движения противоположно форме ближайшей пучности, а ускорение движения максимально.

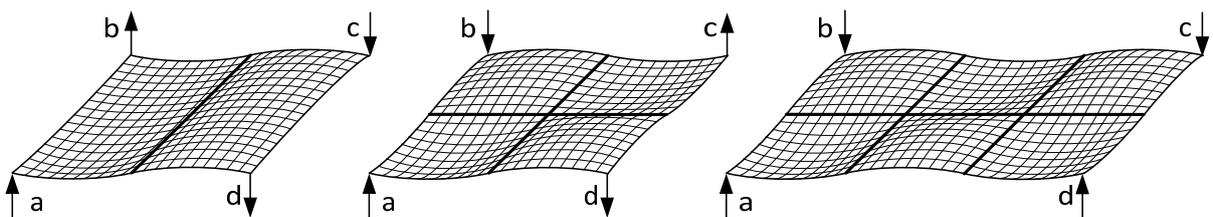


Рис. 3. Формы собственных колебаний пластины при  $j_x = 1, j_y = 2, j_x = 2, j_y = 2$  и  $j_x = 2, j_y = 3$

Следовательно, полностью симметричная форма колебаний получается только при нечетных значениях обоих параметров  $j_x$  и  $j_y$ . Поэтому для возбуждения всех собственных форм при передаче вибросилового воздействия пластине необходимо учитывать фазовый сдвиг в точках ее крепления.

Колебания такой пластины в реальных условиях могут иметь более сложную форму, но любая из них представима в виде суперпозиции собственных колебаний, описываемых уравнением (1). Любая возможная форма колебаний при возбуждении гармоническим сигналом одной частоты может быть получена при одном из трех возможных вариантов фазового сдвига: точки  $a, b$  противофазны  $c, d$ ; точки  $a, d$  противофазны  $b, c$ ; точки  $a, c$  противофазны  $d, b$ .

### 3. Методика проведения испытаний для определения динамических характеристик объектов

Поведение конструкции в резонансе отличает увеличение амплитуды вибрации, фазовый сдвиг между приложенной силой и реакцией и изменение полного сопротивления вибровозбудителя.

Проведение анализа амплитудно-частотной характеристики объекта дает адекватную информацию о четко разделенных резонансах, измеренных в центре пучности, но графики, на которых вершины кривых резонансов слабо выражены вследствие измерения вблизи узловых линий колебаний сложно интерпретировать [6].

На собственных частотах конструкция будет вибрировать по определенной форме, называемой формой моды. Эти частоты также являются резонансами конструкции и характеризуются минимальным значением на кривых механического импеданса и максимальным – на кривых подвижности.

Спектр подвижности можно определить с помощью синусоидального колебания с приложением постоянной силы, вырабатываемой возбудителем и направленной на конструкцию [7]. Сила затем передается толкателем и поддерживается на постоянном уровне с помощью электромагнитной обратной связи. Реакция измеряется акселерометром, после чего передается на регистратор, который синхронизирован с частотой генератора.

Аналогичным способом, а именно, поддержанием постоянной скорости и измерением силы, можно определить и спектр импеданса. Отличительной особенностью импедансной частотной характеристики (ИЧХ) является полное отсутствие влияния средств измерения на объект исследования, что очень важно для исследования таких малогабаритных конструкций, как печатные платы.

Индикация резонансов по вершинам кривых ИЧХ точна и показательна, но имеет серьезный недостаток при определении опасных деформаций: ни величину виброперемещения, ни виброскорости по ИЧХ в достаточных точных пределах определить невозможно. Однако точные значения резонансных частот сами по себе важные и нужные характеристики объекта исследования, опираясь на которые, можно более точно и за более короткое время определить требуемые величины динамических характеристик.

С учетом вышесказанного разработана методика проведения испытаний для определения динамических характеристик объектов, диаграмма которой представлена на рис. 3.

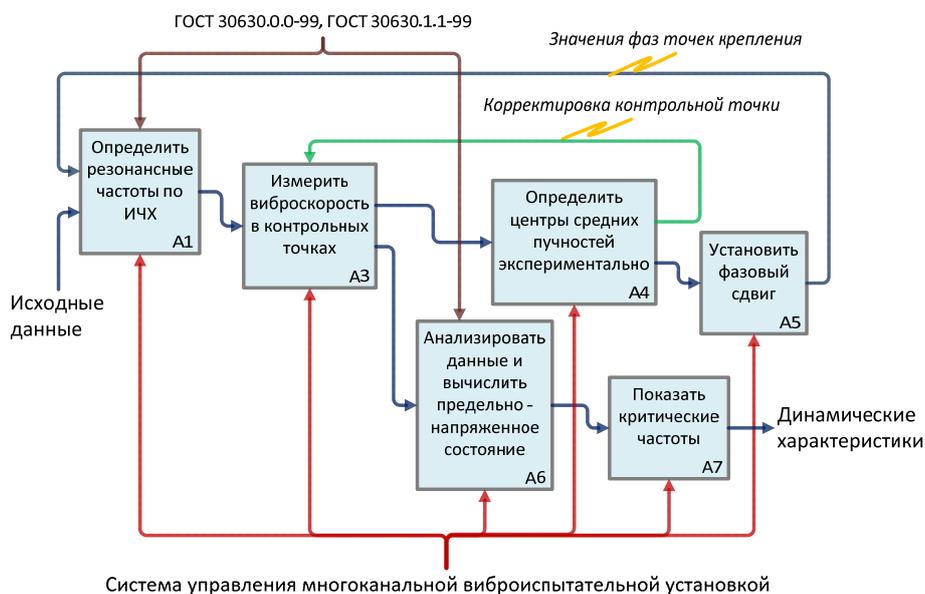


Рис. 3. Диаграмма IDEF0 методики определения динамических характеристик технических объектов

Суть методики состоит в возбуждении резонансов на всех собственных формах, в установленном диапазоне частот, путем введения в вибрационное воздействие разности фаз в продольном, поперечном и диагональном направлении объекта исследования, бесконтактном определении собственных частот и выборе оптимальной точки измерения частотных характеристик для устранения искажений, связанных с попаданием в узловые точки колебаний.

Корректировка точки измерения осуществляется анализом полученных амплитуд в процессе проведения испытаний.

Значения характеристик внешних факторов, действующих на аппаратуру, устанавливаются в соответствии с классификационными группами и данными, приведенными в таблицах разделов 5–11 ГОСТ РВ 20.39.304-98, исходя из анализа условий ее функционирования в составе объекта ВВТ и измеренных значений параметров ВВФ на объекте ВВТ в условиях его эксплуатации и боевого применения.

### **Вывод**

Таким образом, при проведении анализа модели распространения стоячих волн в упругой пластине с конечными размерами выявлено, что полностью симметричная форма колебаний пластины получается только при нечетных значениях параметров  $j_x$  и  $j_y$ . На основе этого сделан вывод, что при передаче вибросилового воздействия пластине необходимо учитывать фазовый сдвиг в точках ее крепления. Разработана методика возбуждения резонансов на всех собственных формах, в установленном диапазоне частот, путем введения в вибрационное воздействие разности фаз в продольном, поперечном и диагональном направлениях объекта исследования и определении оптимальной точки измерения частотных характеристик для устранения искажений, связанных с попаданием в узловые точки колебаний.

### **Список литературы**

1. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 104–106.
2. Затылкин, А. В. Алгоритмическое и программное обеспечение расчета параметров статически неопределимых систем амортизации РЭС / А. В. Затылкин, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 33–40.
3. Лысенко, А. В. Способ снижения величины вибрационных нагрузок в несущих конструкциях электронных средств и методика его реализации / А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 41–44.
4. Остроменский, П. И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов / П. И. Остроменский. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 173 с.
5. ГОСТ 30630.1.8–2002 (МЭК 60068-2-57:1989) Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации с воспроизведением заданной акселерограммы процесса.
6. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. – М. : Высш. шк., 1990. – 400 с.
7. Затылкин, А. В. Исследование влияния деформационной составляющей внешнего вибрационного воздействия на надежность радиоэлектронных средств / А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, Д. А. Рындин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 42–43.
8. Голушко, Д. А. Методика проведения испытания электронных средств на стойкость к внешним вибрационным воздействиям с учетом их конструктивных особенностей / Д. А. Голушко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 373–376.

**Голушко Дмитрий Александрович**  
аспирант,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
8-(412)-36-82-12  
E-mail: oldalez@yandex.ru

**Golushko Dmitriy Aleksandrovich**  
postgraduate student,  
sub-department of radio equipment  
design and production,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Затылкин Александр Валентинович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
8-(412)-36-82-12  
E-mail: al.zatylkin@yandex.ru

**Герасимов Олег Николаевич**

начальник военного представительства,  
МО РФ,  
ОАО «НИИФИ»,  
(440026, Россия, Пенза, Володарского, 8)  
E-mail: gera0502@mail.ru

**Аннотация.** Проведен анализ модели распространения стоячих волн в упругой пластине с конечными размерами. Полученные результаты позволили установить, что для возбуждения всех форм колебаний пластины необходимо учитывать фазовый сдвиг в точках ее крепления, а возбуждение ассиметричных форм собственных колебаний при синфазном вибрационном воздействии в точках крепления невозможно. Эти данные позволили разработать методику возбуждения резонансов на всех собственных формах путем введения в вибрационное воздействие разности фаз в продольном, поперечном и диагональном направлении объекта исследования.

**Ключевые слова:** пластина, резонанс, собственная форма, методика, модель, вибрация.

УДК 623-4

**Голушко, Д. А.**

Методика исследования динамических характеристик технических систем на основе рассогласования фаз внешнего вибрационного воздействия / Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 88–92.

**Zatylkin Alexander Valentinovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio equipment  
design and production,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Gerasimov Oleg Nikolaevich**

head of military mission of The Ministry of defense RF,  
NIIFI  
(440026, 8, Volodarsky street, Penza, Russia)

**Abstract.** The analysis of the propagation model of standing waves in an elastic plate with finite dimensions. The obtained results revealed that for the excitation of all modes of vibration of the plate is necessary to consider the phase shift at the points of its attachment, and excitation of asymmetric forms of natural oscillations with in-phase vibration exposure at the point of attachment is not possible. These data allowed us to develop a methodology of excitation of resonances in all forms of their own by introducing vibrational effect of the phase difference in the longitudinal, transverse and diagonal direction of the object of research.

**Key words:** plate, resonance, own form, method, model, vibrate.

# ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВП НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ МАКРОМОДЕЛИ ПОЛИМЕРНО-УГЛЕРОДНЫХ СИСТЕМ

К. И. Домкин

## *Введение*

В настоящее время защита электрических цепей технических систем от перегрузок является актуальной задачей, поскольку превышение максимального значения тока нагрузки приводит к возникновению повреждений и отказов электрооборудования. При возникновении перегрузок в электрических цепях необходимо отключить техническую систему за кратчайшее время.

Для этого используют следующие устройства: плавкие и биметаллические предохранители, резисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления ( $\alpha_R$ ) – позисторы, реле, электронные ключи и др. Все эти устройства имеют существенные недостатки: биметаллические предохранители неустойчивы к работе при высоких температурах, керамические позисторы потребляют значительную мощность и механически хрупки, а реле обладают самой высокой интенсивностью отказов [1].

В связи с этим все большее внимание разработчиков электронной аппаратуры привлекают самовосстанавливающиеся предохранители (СВП), лишенные этих недостатков. СВП – это резисторы с  $\alpha_R > 0$ , выдерживающие до 3000 переключений без замены, основу которых составляет полимерная композиционная система с распределенными в ней углеродными наночастицами.

В момент снятия приложенного напряжения материал автоматически переходит в исходное низкоомное состояние и затем самовосстанавливается. Значение сопротивления предохранителя в проводящем состоянии составляет доли Ома. Время срабатывания зависит от тока нагрузки и составляет порядка 0,1 с, причем, чем больше ток, тем быстрее срабатывает предохранитель. Еще одно важное преимущество полимерных предохранителей в том, что они стойки к ударным нагрузкам и вибрациям, обладают малыми массогабаритными показателями.

К сдерживающим факторам широкого распространения СВП следует отнести следующее:

- сложность прогнозирования выходных параметров СВП (в частности номинального сопротивления), связанная с недостаточно изученными механизмами формирования морфологии полимерно-углеродных систем;
- недостаточно эффективные технологии управления величиной позисторного эффекта;
- отсутствие промышленных технологий производства СВП, обеспечивающих необходимую повторяемость их выходных параметров.

## *1. Анализ результатов исследования выбора исходных материалов для СВП*

Существующие подходы к формированию структуры (морфологии) полимерно-углеродных систем представлены в работах [2, 3]. Все они видят решение задачи получения полимерно-углеродных систем с требуемыми параметрами за счет подбора известных или получения новых типов исходных материалов, а также комбинации их процентного соотношения.

Для решения специфической задачи получения полимерно-углеродных систем для создания на их основе СВП проведены экспериментальные исследования по выбору наиболее перспективных исходных материалов. Анализ полученных результатов показал следующее.

**В качестве полимеров** наиболее подходящим материалом являются разнообразные полиэтилены [4]: низкого давления ПНД (высокой плотности) с числом молекулярных звеньев до 2000, высокого давления ПВД с числом молекулярных звеньев, более 2500 и различные блок-сополимеры на их основе. Сополимеризация полиэтилена или смеси полиэтилена с другими полимерами понижает температуру плавления, повышает значения показателя текучести расплава. Во всех случаях объемная доля углерода в полиэтилене не превышает 5 об. %.

**В качестве углерода** целесообразно применение углерода марки П267Э и полимера ПЭНД-МА-1 после стадии прессования [5].

**В качестве добавок** оправдано применение олеиновой кислоты [6]. Установлено, что нанесение одного процента олеиновой кислоты на поверхность гранул полиэтилена низкого давления уменьшает его вязкость на 40–60 %. Количество смазок и реологических добавок не превышает одного объемного процента. АСМ-исследования композита показали, что избыток добавок привел к снижению стабильности его структуры.

## 2. Методика прогнозирования номинального сопротивления СВП

Недостаточная проработка вопроса механизма формирования морфологии полимерно-углеродных систем приводит к тому, что после подбора рецептуры невозможно знать номинальное сопротивление без изготовления пробного образца.

Для того, чтобы снизить затраты на изготовление пробной партии образцов и спрогнозировать номинальное сопротивление СВП на ранних этапах производства, разработана следующая методика, основанная на применении АСМ-анализа структуры исследуемой полимерно-углеродной системы (рис. 1):

1. Провести АСМ-анализ структуры исследуемой полимерно-углеродной системы, определив количество слоев частиц углерода ( $n$ ), размеры частиц углерода ( $d$ ) и полимерной матрицы ( $D$ ).

2. Выбрать значение порога перколяции  $\phi_c$  на основе справочных данных и объемную долю углерода  $\phi$  согласно техническому заданию.

3. Рассчитать габаритный параметр ( $Z$ ) по следующей формуле:

$$Z = \frac{h}{S},$$

где  $h$  – толщина;  $S$  – площадь образца полимерно-углеродной системы.

4. Выбрать константу проводимости  $\sigma$  на основе справочных данных.

5. Провести расчет номинального сопротивления, подставив в формулу полученные ранее значения:

$$R = Z\sigma \left( \phi - \phi_c \left( 1 - \left( \frac{nd}{D} \right)^3 \right)^2 \right).$$

В качестве примера использования АСМ-анализа проведено исследование структуры полимерно-углеродной системы на сканирующем зондовом микроскопе SMENA-A, в полуконтактной моде в режимах топографии и «фазового контраста». Измерения проводились кантилевером серии DCP-20 (диаметр 25 нм) с резонансной частотой  $F = 462$  кГц. Объектом исследования являлась полимерно-углеродная система из углерода марки П267Э и полимера ПЭНД-МА-1 после стадии прессования.

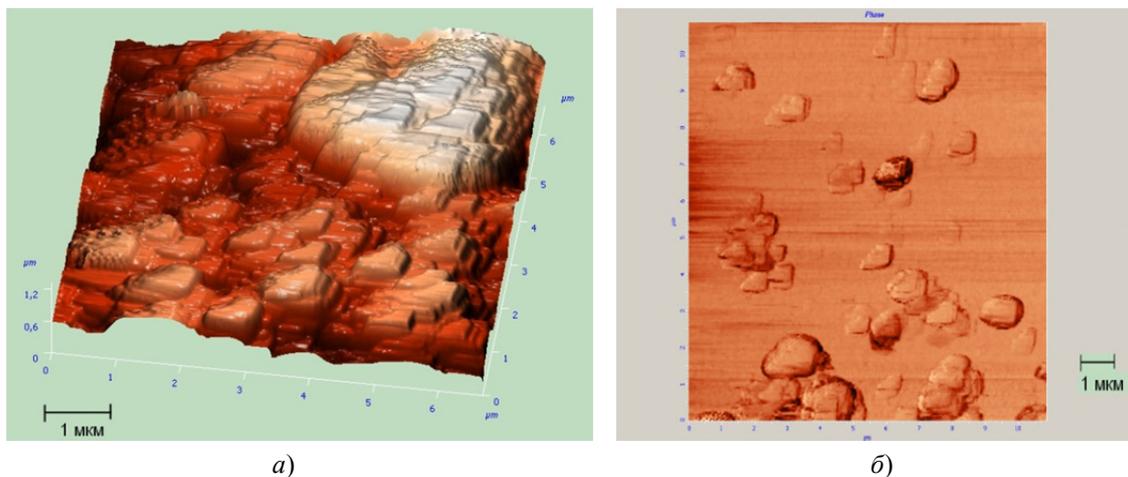


Рис. 1. АСМ-изображения:  
 а – композит СВП в 3D; б – частицы углерода в фазовом контрасте

Разработанное на основе этой методики алгоритмическое и программное обеспечение позволяют в результате обработки информации о структуре полимерно-углеродной системы, полученной после АСМ-анализа, осуществить прогнозирование ее свойств.

### 3. Информационная технология прогнозирования выходных параметров СВП

Результаты проведенных исследований позволили предположить, что управлять свойствами полимерно-углеродной системы можно, изменяя ее морфологический состав. На основе этого предположения разработана двухуровневая макромоделль полимерно-углеродных систем, в которой система представлена в виде черного ящика с управляемыми входами. Структура информационной технологии прогнозирования выходных параметров СВП представлена на рис. 2.

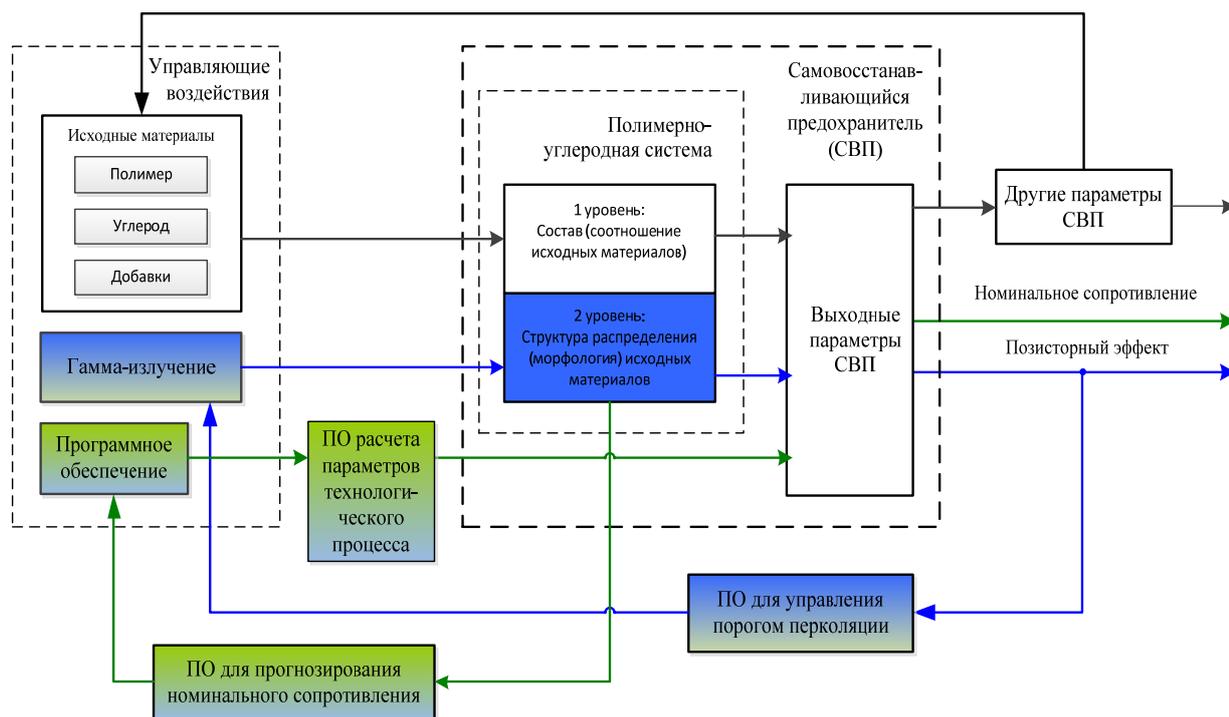


Рис. 2. Структура информационной технологии прогнозирования выходных параметров СВП

Ее особенность заключается в том, что для прогнозирования свойств СВП используются как известные способы управления структурой полимерно-углеродной системы (исходные вещества), так и вновь предложенные (методика и алгоритм).

На основе предложенной ИТ создана программа «Расчет параметров экструзии», предназначенная для расчета оптимальных параметров экструзии полимерных композитов.

Система включает графический интерфейс пользователя, систему управления, базу данных по материалам и модули расчета.

Функциональные возможности системы позволяют осуществить эффективное проведение процесса экструзии полимерного композита по заданным параметрам: составу, массе исходных компонентов, распределение частиц в полимерном композите. Выходными характеристиками программы является плотность композита, его динамическая вязкость, температура экструзии и скорость процесса.

### 4. Полученные результаты

Применение информационной технологии прогнозирования выходных параметров СВП на основе двухуровневой макромоделли полимерно-углеродных систем позволило получить изделия (см. рис. 2), обладающие следующими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

## Параметры полученных СВП

Условное обозначение резисторов	Номинальное сопротивление, $R_{\text{ном}}, 10^{-2}$ Ом	Допускаемое отклонение сопротивления, $\delta R_{\text{ном}}, \%$	Номинальный ток, $I_{\text{ном}}, \text{А}$	Ток размыкания, $I_{\text{разм.}}, \text{А}$	Время размыкания (быстродействие), $t_{\text{разм.}}, \text{с}$ , не более
P1-200-1	1,5	$\pm 10$	1,2	2,7	5,0
P1-200-2					
P1-200-3			1,5	3,0	
P1-200-4	8,2		1,75	3,8	4,0
P1-200-5					
P1-200-6	5,6		2,0	4,4	
P1-200-7	2,7		3,5	6,3	3,0
P1-200-8	2,2		4,2	7,6	6,0

Результаты исследований использованы при проведении работ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. в следующих проектах:

– «Исследование научно-методологических и материаловедческих основ наноконпозиционных резисторных структур и создание суперминиатюрных чип-резисторов и самовосстанавливающихся предохранителей на фазовом переходе первого рода» (№ 716П от 20.05.10);

– «Производство композиционных материалов на основе метода определения оптимальных размеров частиц» (№ П416 от 12.05.10).

**Выводы**

Разработанная в ходе работы методика прогнозирования номинального сопротивления СВП, доведенная до алгоритмической и программной реализации, позволяет после обработки информации о структуре полимерно-углеродной системы, полученной АСМ-анализом, осуществить эффективное прогнозирование номинального сопротивления изделия.

Предположенная информационная технология прогнозирования выходных параметров СВП, построенная на основе разработанной двухуровневой макро модели полимерно-углеродных систем, дополненная новой методикой прогнозирования номинального сопротивления СВП, позволяет обеспечить необходимую повторяемость выходных параметров изделий.

**Список литературы**

1. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
2. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – 2-е изд. – М.: Химия, 1983. – 545 с.
3. Voiteux G: Structure and water sorption of polyurethane nanocomposites based on organic and inorganic components / Ye. P. Mamunya, V. I. Shtompel, E. V. Lebedev et. al. // Europ. Polym. J. – 2004. – V. 40. – P. 2323–2331.
4. Домкин, К. И. Полимерные композиционные материалы на основе проводящих нанопорошков углерода для самовосстанавливающихся предохранителей / К. И. Домкин, В. Г. Недорезов, Н. К. Юрков. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 128 с.
5. Каминская, Т. П. Исследование гранулометрического распределения порошков стекла для толсто пленочной технологии с применением лазерной дифракции на приборе «ANALYSETTE 22» COMPACT / Т. П. Каминская, С. В. Подшибякин, К. И. Домкин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2007. – Т. 2. – С. 69–70.
6. Домкин, К. И. Разработка самовосстанавливающихся предохранителей для защиты электрических цепей вычислительной техники / К. И. Домкин, В. Г. Недорезов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2011. – № 2. – С. 90–96.

**Домкин Кирилл Иванович**

инженер,  
научный отдел,  
Научно-производственное предприятие «Рубин»  
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)  
E-mail: ego85@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты анализа современного состояния и тенденций развития защиты электрических цепей технических систем. Выявлено, что сдерживающими факторами широкого распространения самовосстанавливающихся предохранителей (СВП) являются, во-первых, сложность прогнозирования выходных параметров СВП, связанная с недостаточно изученной морфологией полимерно-углеродных систем, а, во-вторых, отсутствие промышленных технологий производства СВП, обеспечивающих необходимую повторяемость их выходных параметров. Для снятия указанных факторов предложена информационная технология прогнозирования выходных параметров СВП, построенная на основе разработанной двухуровневой макромоделли полимерно-углеродных систем, дополненная новой методикой прогнозирования номинального сопротивления СВП.

**Ключевые слова:** самовосстанавливающиеся предохранители, полимерно-углеродные системы, выходные параметры, информационная технология, макромоделль.

УДК 678.07

Домкин, К. И.

**Информационная технология прогнозирования выходных параметров СВП на основе двухуровневой макромоделли полимерно-углеродных систем / К. И. Домкин // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 93–97.**

**Domkin Kirill Ivanovich**

engineer,  
research department,  
scientific-industrial enterprise «Rubin»  
(440000, 2 Baydukov street, Penza, Russia)

**Abstract.** The paper presents the results of the analysis of the current status and trends in the protection of electrical circuits technical systems. Identified that the limiting factors of the wide distribution of multifuses is the difficulty of predicting its output parameters associated with poorly understood morphology of polymer-carbon systems, and secondly, the lack of industrial production technologies for multifuses provides the necessary repeatability of their output parameters. To escape these factors proposed information technology forecasting multifuse output parameters, built on the basis of the developed two-level macromodel polymer-carbon systems, complemented by the new method of forecasting the nominal resistance of the multifuse.

**Key words:** resettable fuses, multifuses, polymer-carbon system, output parameters, information technology, macromodel.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РЭС

А. С. Жумабаева, А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров

### *Введение*

Изделия современной радиоэлектронной промышленности относятся к сложным наукоемким изделиям, к которым предъявляются высокие требования по физическим и эстетическим показателям, закладываемые на этапах жизненного цикла.

Применение методов математического моделирования дает возможность проводить исследования физических процессов, протекающих в конструкциях и их элементах, и определять на этапе проектирования их динамические характеристики, которые, в свою очередь, являются основой для прогнозирования поведения изделия в заданных условиях эксплуатации [1–4].

Поэтому разработка математической модели прогнозирования динамических характеристик стержневых элементов конструкций РЭС и программного обеспечения на ее основе является актуальной научно-практической задачей.

### *1. Анализ имеющихся аналогов*

В настоящее время существует различное программное обеспечение по моделированию внешних механических воздействий на конструкции бортовых радиоэлектронных средств. Наиболее распространенными являются:

- программы «Balka» и «Beam» для расчета однопролетных статически определимых и многопролетных статически неопределимых 1D балок (стержней) Евгения Токарева [3]. Крайнее обновление на данный момент – сентябрь 2011 г.;
- программа «Полюс» компании MechCad Software [4]. «Полюс» позволяет проводить анализ статически определимых и неопределимых плоских конструкций. Строит эпюры продольных и поперечных усилий, крутящих моментов, перемещений узлов;
- конечно-элементное моделирование (например, ANSYS). При этом с относительной легкостью можно получить численное решение практически любой стержневой системы, но вот обрабатывать полученные результаты – весьма сложно. Кроме того, стоимость конечно-элементных программ очень высока.

Подводя итог анализа существующих программ моделирования воздействия внешних нагрузок на статические и динамические параметры стержней и стержневых конструкций можно сказать, что все они ориентированы на проведение расчетов для строительных сооружений и мало пригодны для проведения расчетов в области электроники [1, 2, 5]. Кроме того, наиболее функциональные программы не бесплатны.

Основным недостатком является построение АЧХ конструкции на основе результатов модального анализа, проводимого на различных частотах, что, во-первых, очень долго, а, во-вторых, есть возможность пропуска той или иной резонансной частоты [5, 6].

Таким образом, следует сделать следующий вывод: разработка программы имитационного моделирования АЧХ стержневых конструкций бортовых РЭС, свободной от указанных недостатков, является актуальной задачей.

### *2. Математический аппарат*

Стержневые конструкции могут совершать различные колебания. Для определения амплитуд, механических напряжений в элементах стержневых конструкций в процессе эксплуатации рассмотрим уравнение их движения при вынужденных колебаниях. Изгибные колебания в стержне описываются однородным уравнением

$$EJ \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\omega(x, t)$  – смещение точек стержня перпендикулярно упругой оси;  $E$  – модуль Юнга;  $J$  – момент инерции сечения относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба;  $\rho$  – плотность материала;  $S$  – площадь поперечного сечения стержня.

Обозначая изгибную жесткость стержня как  $C_s = EJ$ , учтем потери энергии при колебаниях в виде диссипативной силы, пропорциональной скорости деформации и в правую часть добавим внешнюю силу  $F(x, t)$ , возбуждающую колебания и приложенную в точках крепления. Тогда уравнение вынужденных изгибных колебаний стержня запишется в виде

$$C_s \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \eta \frac{\partial}{\partial t} C_s \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = F(x, t), \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости материала.

В соответствии с методом конечных разностей заменим сплошной стержень совокупностью дискретных элементов с шагом разбиения по оси  $x$ , равным  $h_x$ . Массу каждого дискретного элемента сосредоточим в его центре – узле, лежащем на оси  $x$ ; силы взаимодействия между дискретными элементами заменяем упругими связями между узлами. Получим геометрическую дискретную модель стержня, состоящую из  $n$  узлов, соединенных упругими связями.

Заменив первую производную по времени в левой части (2) ее разностным аналогом и полагая, что  $L(\omega) = \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4}$ , запишем его в виде

$$C_s L(\omega)_t + \frac{\eta}{\tau} [C_s L(\omega)_t - C_s L(\omega)_{t-\tau}] = -\rho S \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – шаг дискретизации по времени, а сила  $F(x, t)$  учитывается в начальных условиях.

Раскрыв скобки и сгруппировав подобные члены (3), получим

$$\left[ \frac{(1 + \frac{\eta}{\tau}) C_s}{\rho S} L(\omega)_t - \frac{\eta C_s}{\rho S} L(\omega)_{t-\tau} \right] = \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Учитывая, что вторая производная от перемещения по времени есть ускорение  $a$  узла, запишем (4) в виде  $a = \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}$  и, заменив вторую производную по времени разностным аналогом, получим

$$-\tau^2 a = \omega_x(t + \tau) - 2\omega_x(t) + \omega_x(t - \tau).$$

Преобразуем (4) к виду явного разностного уравнения:

$$-\tau^2 a + 2\omega_x(t) - \omega_x(t - \tau) = \omega_x(t + \tau),$$

которое, будучи дополнено граничными и начальными условиями, образует явную разностную схему, которая в сочетании с геометрической моделью дает расчетную модель стержня, достаточно просто реализуемую на ПК.

### 3. Алгоритмическая и программная реализация

Структурный состав программы позволяет пользователю ввести данные, необходимые для проведения расчетов, просмотреть результаты и сохранить их в файл.

Основная программа должна содержать перечень всех используемых модулей и несколько исполняемых операторов, обеспечивающих создание нужных окон и связь программы с Windows. Работоспособность программы обеспечивается кодом, содержащимся в отдельных модулях. Код процедур и функций располагается в исполняемой части модуля, которая может быть скрыта от пользователя.

Порядок выполнения этапов указывается стрелками, соединяющими блоки. Геометрические фигуры размещаются сверху вниз и слева направо. Нумерация блоков производится в порядке их размещения в схеме.

Алгоритмическое обеспечение разработанной программы показано на рис. 1. Представленный алгоритм содержит циклические структуры (циклические алгоритмы). Циклическое описание многократно повторяемых процессов значительно снижает трудоемкость написания программ.

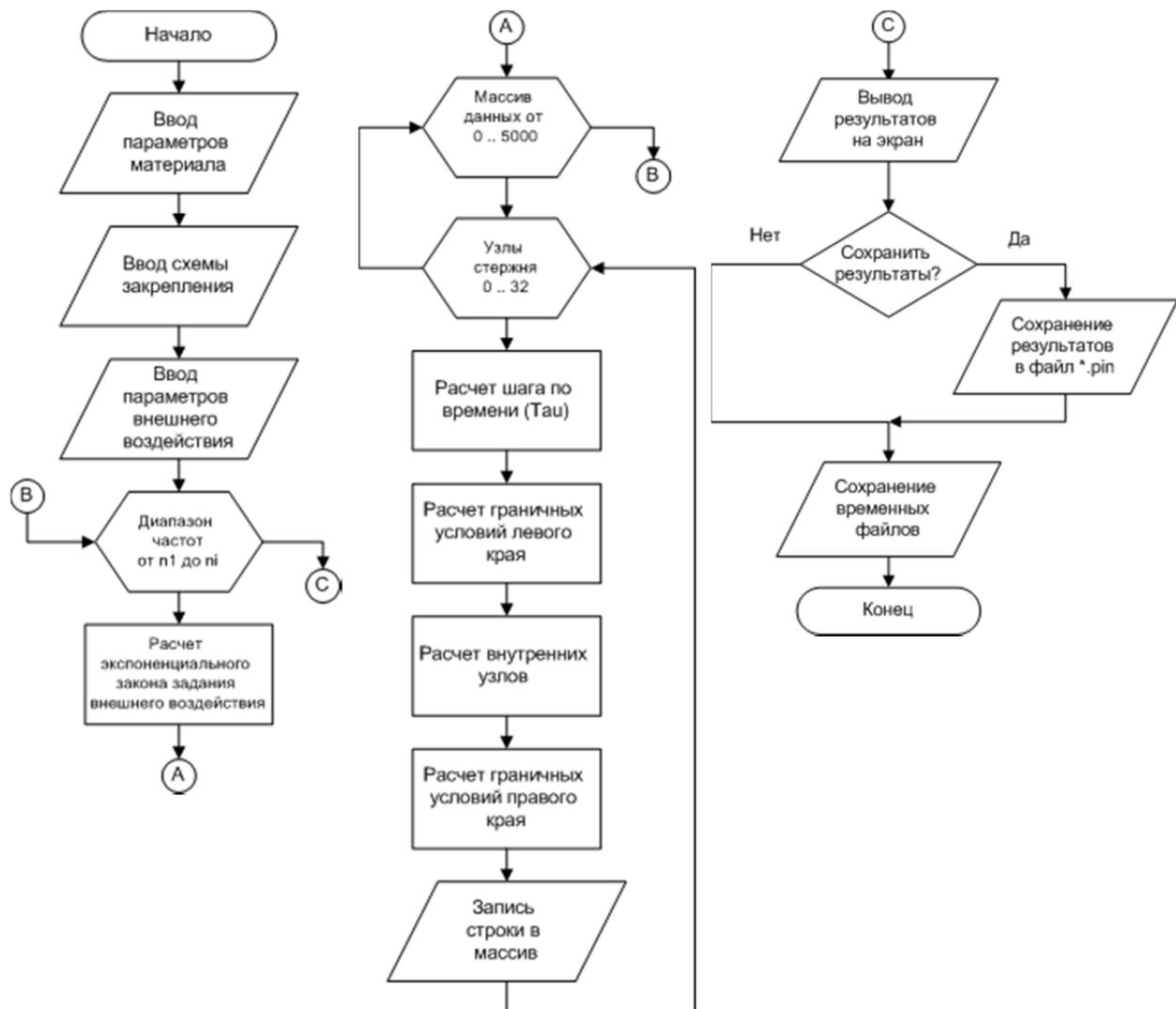


Рис. 1. Алгоритмическое обеспечение программы

Порядок выполнения операторов соответствует решению математических уравнений и соответствует предложенной структурной схеме программы.

Несмотря на то, что интерфейсы непрерывно совершенствовались в течение двух десятилетий, опубликованы руководства по созданию интерфейсов и созданы средства их разработки, проблема совершенствования интерфейсов пользователя с учетом более глубоких познаний менталитета и психологии пользователя является актуальной. Тем более что проблема разработки однопользовательских интерфейсов еще не решена, а если индивидуальное взаимодействие с некоторой системой не проходит для пользователя легко и комфортно, то в результате этот недостаток будет негативно отражаться на качестве работы всей системы, независимо от того, насколько она хороша в других своих проявлениях.

С учетом рассмотренных положений разработки интерфейса информационных систем предложен интерфейс программы имитационного моделирования АЧХ стержневых конструкций бортовых РЭС, показанный на рис. 2.

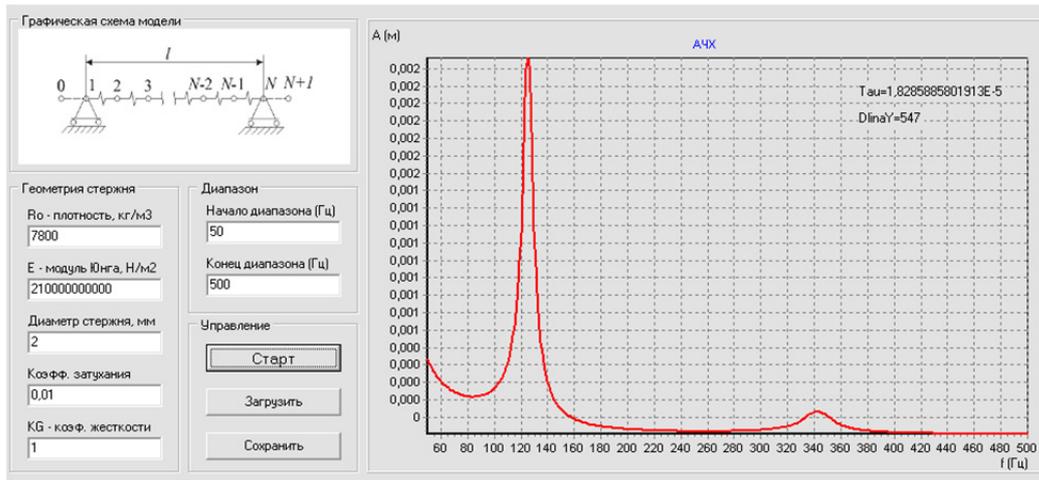


Рис. 2. Интерфейс программы имитационного моделирования АЧХ стержневых конструкций бортовых РЭС

#### 4. Инженерная методика работы с программным обеспечением

Постоянное усложнение технических систем вызывает необходимость проведения их анализа с целью совершенствования функционирования и повышения эффективности. В США это обстоятельство было осознано еще в конце 70-х гг., когда ВВС США предложили и реализовали Программу интегрированной компьютеризации производства ICAM (ICAM – Integrated Computer Aided Manufacturing), направленную на увеличение эффективности промышленных предприятий посредством широкого внедрения компьютерных (информационных) технологий.

Реализация программы ICAM потребовала создания адекватных методов анализа и проектирования производственных систем и способов обмена информацией между специалистами, занимающимися такими проблемами. Для удовлетворения этой потребности была разработана методология IDEF, позволяющая исследовать структуру, параметры и характеристики производственно-технических и организационно-экономических систем.

В настоящее время методология IDEF отражена и в стандарте ГОСТ Р 50.1.028-2001. Предложенная методика работы с программой имитационного моделирования представлена в виде диаграммы IDEF0 на рис. 3. Последовательность выполняемых действий состоит из задания параметров материала и схемы закрепления, задания параметров внешнего воздействия, проведения моделирования конструкции в заданном диапазоне частот, сохранения полученных результатов и проведения анализа полученных динамических параметров моделируемой конструкции.

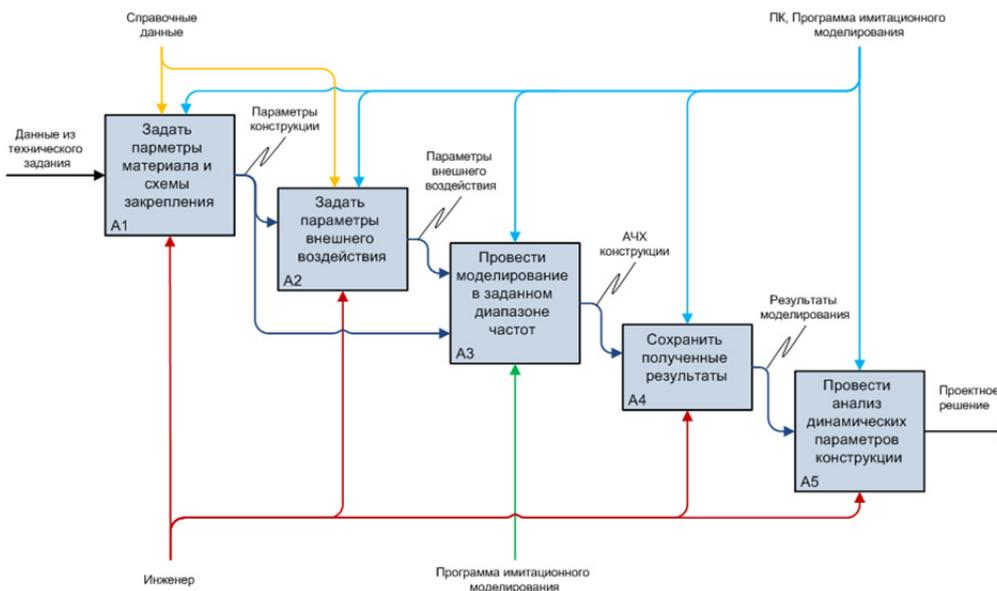


Рис. 3. Инженерная методика работы с программным обеспечением в виде диаграммы IDEF0 по ГОСТ Р 50.1.028-2001

Далее рассмотрим более подробно каждый из них.

На этапе задания параметров материала и схемы закрепления пользователю следует задать значения модуля Юнга, удельной плотности материала и граничные условия (жестко закрепленные края, шарнирное закрепление или комбинированное). Входными данными процесса служат данные из технического задания. Выходными данными процесса являются подготовленные для дальнейших расчетов параметры моделируемой конструкции.

На этапе задания параметров внешнего воздействия пользователю следует указать диапазон частот и максимальные ускорения, которые будут влиять на работоспособность конструкции на этапе эксплуатации. Входными данными процесса служат подготовленные для расчетов параметры моделируемой конструкции. Выходными данными процесса являются параметры внешнего воздействия, подготовленные для дальнейших расчетов моделируемой конструкции.

На этапе проведения моделирования поведения конструкции в заданном диапазоне частот программа выполняет расчет и построение амплитудно-частотной характеристики моделируемой конструкции. Входными данными процесса служат параметры моделируемой конструкции и параметры внешнего воздействия. Выходными данными процесса является амплитудно-частотный спектр колебаний моделируемой конструкции.

На этапе сохранения полученных результатов программа сохраняет полученные результаты в файл. Входными данными процесса служит амплитудно-частотный спектр колебаний. Выходными данными процесса является файл формата \*.pin.

На этапе анализа полученных параметров моделируемой конструкции (амплитудно-частотный спектр колебаний и формы изгибных колебаний) делается вывод о необходимости внесения конструктивных изменений.

Таким образом, была разработана методика работы с программой имитационного моделирования на основе методологии IDEF0, позволяющая проводить анализ амплитудно-частотных характеристик исследуемой конструкции.

### **Выводы**

Применение разработанной модели позволяет проводить исследования физических процессов, протекающих в конструкциях и их элементах, и определять на этапе проектирования их динамические характеристики, которые, в свою очередь, являются основой для прогнозирования поведения изделия в заданных условиях эксплуатации.

### **Список литературы**

1. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения глобальной безопасности / Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 6–8.
2. Таньков, Г. В. Волновой метод исследования динамических характеристик упругих конструкций радиоэлектронных средств при нестационарном нагружении / Г. В. Таньков, А. В. Затылкин, Д. А. Рындин // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 2. – С. 101–107.
3. Beamcalc [Electronic resource]: industry solutions. – URL: <http://beamcalc.ru>
4. Mechcad [Electronic resource]: modeling systems. – URL: <http://www.mechcad.net>
5. Затылкин, А. В. Система управления проектными исследованиями радиотехнических устройств : дис. ... канд. техн. наук / А. В. Затылкин. – М., 2012.
6. Остроменский, П. И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов / П. И. Остроменский. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 173 с.

#### **Жумабаева Асель Сагнаевна**

старший преподаватель,  
кафедра космической техники и технологии,  
Евразийский национальный университет  
им. Л. Н. Гумилева  
(Казахстан, г. Астана)  
8-(412)-36-82-12,  
E-mail: [almatyaseri@mail.ru](mailto:almatyaseri@mail.ru).

#### **Zhumabaeva Asel Sagnaevna**

senior lecturer,  
sub-department of space technique and technology,  
Eurasian National University  
named after L. N. Gumileva  
(Astana, Kazakhstan)

**Затылкин Александр Валентинович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
8-(412)-36-82-12  
E-mail: al.zatylkin@yandex.ru

**Кочегаров Игорь Иванович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
8-(412)-36-82-12  
E-mail: ico@mail.ru.

**Аннотация.** В данной статье рассмотрен вопрос моделирования воздействия внешних механических воздействий на амплитудно-частотные характеристики стержневых конструкций РЭС. Показано, что применение методов математического моделирования дает возможность проводить исследования физических процессов, протекающих в конструкциях и их элементах, и определять на этапе проектирования их динамические характеристики, которые, в свою очередь, являются основой для прогнозирования поведения изделия в заданных условиях эксплуатации. Рассмотрены программные аналоги, выбран математический аппарат. Предложенные теоретические положения доведены до алгоритмической и программной реализации. Предложена инженерная методика работы с программным обеспечением в виде диаграммы IDEF0 (ГОСТ Р 50.1.028-2001). Разработанное программное обеспечение, способное проводить анализ амплитудно-частотных характеристик исследуемой конструкции для выявления опасных резонансных частот в рабочем диапазоне является актуальным и востребованным.

**Ключевые слова:** удары, вибрации, надежность, амортизатор, программа, алгоритм, инженерная методика.

УДК 59.13.21

**Жумабаева, А. С.**

**Математическая модель прогнозирования динамических характеристик стержневых элементов конструкций РЭС / А. С. Жумабаева, А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 98–103.**

**Zatylkin Alexander Valentinovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio equipment  
design and production,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Kochegarov Igor Ivanovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio equipment  
design and production,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Abstract.** Mathematical model prediction of dynamic characteristics of forecasting structures electronic warfare

Annotation. In this article the problem of modeling of the impact of external shocks on the amplitude-frequency characteristics of the beam structures RES. It is shown that application of methods of mathematical simulation gives an opportunity to study physical processes in constructions and their elements, and to determine at the design stage of their dynamic characteristics, which, in turn, are the basis for predicting the behavior of the product under specific conditions of operation are. Considered software counterparts, selected mathematical apparatus. The proposed theoretical concepts brought to algorithmic and software implementation. Proposed engineering technique of work with the software in the form of a diagram IDEF0 (GOST P 50.1.028-2001). Developed software, capable to carry out the analysis of the amplitude-frequency characteristics of the study designs to detect dangerous resonance frequency within the operating range is relevant and in demand.

**Key words:** shock, vibration, reliability, shock absorber, program, algorithm, engineering technique.

### ***Вниманию авторов!***

Редакция научно-практического журнала «Надежность и качество сложных систем» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения по следующей тематике:

Наименование раздела	Коды ГРНТИ
<b>ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА</b>	28.27.00 Теория надежности. 28.27.15 Оптимизация надежности. 28.27.19 Количественные характеристики. 28.27.27 Методы оценки надежности
<b>НАДЕЖНОСТЬ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b>	28.27.23 Надежность эргатических систем
<b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ</b>	47.13.00 Технология и оборудование для электронного и радиотехнического производства. 47.13.17 Технология производства печатных плат. Печатный монтаж. 47.14.17 Проектирование и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. 50.13.00 Технология и оборудование для производства средств автоматики и вычислительной техники
<b>НАДЕЖНОСТЬ СЕТЕЙ СВЯЗИ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ</b>	49.33.35 Надежность сетей связи и защита информации
<b>НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОТКАЗНОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ</b>	55.03.05 Надежность и долговечность машин. 59.03.13 Теория надежности и долговечности приборов. 81.81.07 Надежность. Безотказность, долговечность, ремонтпригодность
<b>ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ</b>	59.13.21 Технология и оборудование для испытания и контроля качества приборов. 59.45.71 Узлы, блоки, элементы, детали приборов неразрушающего контроля изделий и материалов
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И БОЕВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ</b>	78.21.53 Исследования и разработки в области эффективности, надежности и боевого использования вооружения и военной техники
<b>МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ</b>	81.81.05 Системы управления качеством. 81.81.17 Методы контроля качества. 81.81.19 Контроль качества на стадиях жизненного цикла продукции. 81.81.21 Контроль качества технологических процессов
<b>СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ И СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА</b>	81.81.26 Сертификация продукции и систем обеспечения качества

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (kipra@pnzgu.ru, дискета 3,5", CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи – 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt, через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья **обязательно** должна сопровождаться индексом УДК, аннотацией, содержащей 150–200 слов; 7–10 ключевыми словами, а также сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы и должность, ученая степень, ученое звание, адрес, контактные телефоны, e-mail) **на русском и английском языках.**

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версии 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

**Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.**

**Уважаемые читатели!**

Для гарантированного и своевременного получения журнала «Надежность и качество сложных систем» рекомендуем вам оформить подписку.

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс (841-2) 36-84-87, тел.: 36-84-87, 56-47-33; E-mail: [VolgaVuz@mail.ru](mailto:VolgaVuz@mail.ru)

Подписку на первое полугодие 2015 г. можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» «Газеты. Журналы», тематический раздел «Надежность и качество сложных систем». Подписной индекс – 43305.

Федеральное государственное унитарное предприятие "Почта России"										ФСП-1	
Бланк заказа периодических изданий											
<b>АБОНЕМЕНТ</b>										На газету журнал	
<b>Надежность и качество</b>										<b>43305</b>	
(наименование издания)										(индекс издания)	
<b>сложных систем</b>										Количество комплектов	
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Куда _____				_____				_____			
(почтовый индекс)				(адрес)							
Кому _____											
----- Линия отреза -----											
						<b>ДОСТАВОЧНАЯ</b>			<b>43305</b>		
ПВ место литер						<b>КАРТОЧКА</b>			(индекс издания)		
На газету журнал			<b>Надежность и качество сложных систем</b>								
			(наименование издания)								
Стоимость	подписки			руб.			Количество комплектов				
	каталожная			руб.							
	переадресовки			руб.							
На 20 _____ год по месяцам											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Город _____			_____								
село _____			_____								
почтовый индекс _____			область _____								
_____			Район _____								
код улицы _____			улица _____								
_____			_____								
дом _____	корпус _____	квартира _____	Фамилия И.О. _____								