

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. ФЕНОМЕН «ВРЕМЯ» В ТЕОРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	3
Селиванова З. М., Хоан Т. А. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ	13
Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА: УПРАВЛЕНИЕ ЗАМЕЩЕНИЕМ КРИТЕРИЯ	20
Гришко А. К. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ И ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ТЕОРИИ ВЕКТОРНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ЗАДАЧ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ	26
Люминарский И. Е., Люминарская Е. С. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ С УПРУГИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	35

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Затучный Д. А. К ВОПРОСУ О ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ	43
Затучный Д. А. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПЕРЕДАВАЕМОЙ С БОРТА ВОЗДУШНОГО СУДНА В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ	46
Menshova S. B. TENDENCIES IN CREATING MODERN RADIO ABSORBING MATERIALS AND COATINGS	51
Воронов С. А., Гордийко Н. А., Богорош А. Т., Шайко-Шайковский А. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДКЛАДКЕ	60
Адамова А. А., Адамов А. П., Ирзаев Г. Х. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬЮ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА	67
Куатов Б. Ж., Кемалов Б. К., Бикеев Р. Р. ВЛИЯНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ТРЕНАЖЕРОВ НА ПЛАНИРОВАНИЕ ТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ	76

Геращенко С. И., Геращенко С. М., Костенков С. Ю., Янкина Н. Н., Карнаухов В. В. ПРЕПАРИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОСТНОГО РЕГЕНЕРАТА ПРИ НАСТРОЙКЕ СКАНИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ.....	82
Штыков Р. А., Разживина Г. П., Юрков Н. К. ПОСТРОЕНИЕ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ СЛОЖНОСОСТАВНОГО ГОРЮЧЕГО ГАЗА.....	92

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Елинов Д. А., Бирюкова О. В., Долотин А. И. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕТРОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ	97
Тюгашев А. А. ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БОРТОВЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ.....	106
Абдулкадим Х. А., Васильев К. К., Дементьев В. Е. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ АВТОНОМНЫХ АППАРАТОВ.....	113
Иванов А. И., Ахметов Б. Б., Серикова Ю. И. УСИЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ХИ-КВАДРАТ КРИТЕРИЯ ПРИ ДЕСЯТИКРАТНОМ УВЕЛИЧЕНИИ ЧИСЛА СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ СТАТИСТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА МАЛЫХ ТЕСТОВЫХ ВЫБОРКАХ.....	121
Лапшин Э. В., Кемалов Б. К., Куатов Б. Ж. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ	128

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 519.87

DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-1

ФЕНОМЕН «ВРЕМЯ» В ТЕОРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко

Введение

В соответствии с [1, 2] под техногенным риском в данной статье будем понимать ущерб (последствия) в результате наступления исходного возможного события (отказа, аварии, катастрофы) в некоторой стохастической ситуации применения сложной динамической системы (СДС). Техногенный риск как случайная величина задается на вероятностном пространстве (Ω, F, P) , которое представляет собой следующее:

Ω – непустое множество элементарных исходов;

F – σ -алгебра событий, элементы которого являются подмножествами множества Ω и называются событиями, $\Omega \in F$;

Q – σ -аддитивная функция множеств Q , определенная на F и нормированная условием $Q(\Omega) = 1$, является вероятностной мерой, или вероятностью.

Для события $A \in F$ значение $Q(A)$ называется вероятностью исходного события A .

Тройка (Ω, F, Q) называется вероятностным пространством или вероятностной моделью.

Так как риск связан с реальными неопределенными ситуациями, то для того, чтобы его математически адекватно описать с помощью теории вероятностей, необходимы определенные свойства и условия:

– *«непредсказуемость»*: исход стохастической ситуации невозможно заранее предсказать с абсолютной точностью. Это свойство очевидно, ибо если исход ситуации прогнозируем однозначно, то вообще нет никакой необходимости в привлечении аппарата теории вероятностей;

– *воспроизводимость*: это свойство является ключевым для того, чтобы быть уверенным в успехе применения аппарата теории вероятностей к описанию стохастических ситуаций. Теория вероятностей и математическая статистика направлены на изучение массовых явлений. Учитывая слабую воспроизводимость редких событий, многие попытки применения теории вероятностей к анализу уникальных сложных систем могут давать весьма противоречивые результаты, далекие от адекватности реальной жизни;

– *устойчивость частот*: частота интересующего нас события, связанного с рассматриваемой ситуацией при многократном воспроизведении этой ситуации, колеблется возле некоторого числа, приближаясь к нему только при увеличении количества воспроизведений ситуаций» [1].

Риск всегда связан с наступлением некоторого, вообще говоря, случайного события A , которое называется рисковым событием (исходным событием аварии, катастрофы) из возможного семейства F событий, описывающих рассматриваемую рисковую ситуацию. При этом эти события обычно каким-то образом распределены во времени и сопровождаются определенными мате-

¹ Работа поддержана РФФИ (проекты №14-01-00230, 15-41-00001).

риальными или иными ущербами, вообще говоря, также случайными по величине. Таким образом, риск характеризуется двумя величинами – временем T наступления рисковогó события и величиной C приносимогó им ущерба. Поэтому с этой точки зрения под *риском* понимается вероятностная модель (вероятностное пространство)

$$R = \{\Omega, F, Q\}, \tag{1}$$

на которой определена двухкомпонентная случайная величина (T, C) , первая из компонент которой T – время наступления рисковогó события A , отсчитываемое от некоторогó фиксированного момента, а вторая C указывает ущерб, приносимый этим рисковым событием:

$$R(p, c, t) = R\{P < p_i, C < c_i, T < t\}, \tag{2}$$

где $i = \overline{1, N}$ – число возможных рисковогó событий.

Обобщенная динамическая модель техногенного риска от эксплуатации системы показана на рис. 1. Рассмотрим множества: $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, $q_i \in Q$, $i = \overline{1, n}$ – множество возможных вероятностей исходных событий (отказов, аварий, катастроф), $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, $c_i \in C$, $i = \overline{1, n}$ – множество последствий (ущерба) от свершения i -тых исходных событий, $t_i \in T$ – множество моментов времени, $r_i \in R$ – множество возможных рисков, $R = \sum_{i=1}^n R_i$.

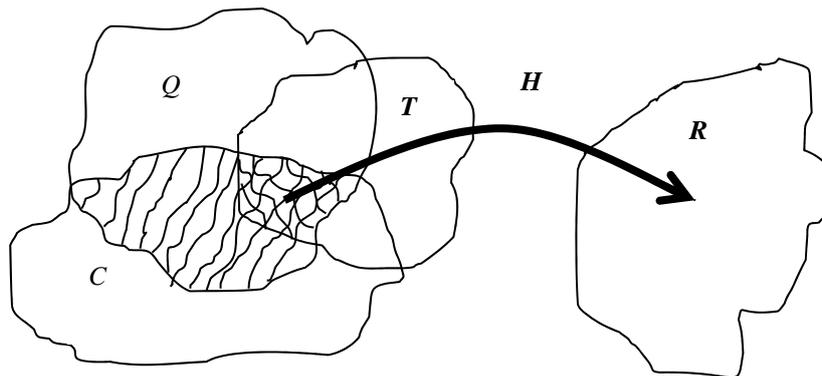


Рис. 1. Графическая интерпретация соотношения множеств риска R , вероятностей исходных событий Q , ущерба C во времени T эксплуатации сложной динамической системы

Очевидно, что

$$R = H\{Q \times C \times T\} \tag{3}$$

или в скалярной форме

$$R(q, c, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t)c_i(t), \tag{4}$$

где H – оператор, реализующий отображение

$$Q \times C \times T \rightarrow R \tag{5}$$

или

$$R(q, c, t) = H\{t, t_0, R_0(q_0, c_0, t_0), R(q, c)_{t_0}^t\}, \tag{6}$$

где t – текущий момент времени, в котором определяется риск; t_0 – начальный момент наблюдения за состоянием системы, $t \geq t_0$; q_0, c_0, R_0 – вероятность исходных состояний динамической системы, ущерб и риск в начальный момент времени наблюдения за состоянием системы.

Постановка задачи

В работах [2–6] разработана классификация моделей техногенного риска сложных динамических систем, в которых детально сформулирован теоретико-множественный подход к анализу характеристик множеств R , Q и C при математическом моделировании техногенного риска.

При статистическом исследовании составляющие $R(t)$, $Q(t)$ рассматриваются как случайные функции времени, в общем случае – векторные. Если представить риск как возможный ущерб, то модель $R = f(T)$ времени должна обладать следующими свойствами:

1) процесс изменения во времени $R = f(T)$ рассматривается в общем случае как нестационарный стохастический процесс;

2) длительность наблюдения за системой в течение T конечна;

3) энергетический спектр случайного процесса $R(T)$ сплошной и отличен от нуля на всей оси частот $-\infty < \omega < \infty$;

4) интервал корреляции τ_0 случайной функции $R = f(T)$ ограничен. Причем под интервалом корреляции принимается промежуток времени, за который полностью затухают корреляционные связи между отдельными составляющими $R(t)$, $Q(t)$. При нестационарном характере изменения случайной функции $R = f(T)$ интервал корреляции в общем случае зависит от рассматриваемого момента времени, т.е. $\tau_0 = f(t)$.

Нестационарные случайные процессы изменения $R = f(T)$ целесообразно представлять в виде суммы нескольких процессов $R = f(T)$:

$$R(t) = A(t) + B(t) + \varepsilon(t), \quad (7)$$

где $A(t)$ – нестационарный случайный процесс, характеризующий необратимые изменения в системе в результате старения, изнашивания, регулирования; $B(t)$ – стационарный случайный процесс, характеризующий обратимые изменения $R(t)$ из-за колебаний внешних условий при эксплуатации системы; $\varepsilon(t)$ – стационарный случайный процесс ошибок измерений $Q(t)$.

В ранней работе [7] приведены методы оценки фактора времени при планировании многофакторных испытаний на надежность сложных критических систем (параметра Q):

1) метод фактора времени при моделировании риска в условиях ортогонального дрейфа;

2) метод оценки фактора времени путем преобразования параметров регрессии из функций времени в числовые коэффициенты;

3) модели оценки фактора времени в эксперименте, когда одна из контролируемых переменных – время;

4) метод оценки фактора времени с применением спектрально-корреляционной теории случайных процессов.

Следует сказать, что в довольно обширной литературе по теории риска мало внимания уделено моделированию фактора времени. Это частично объясняется, если вспомнить, что теория риска сложных динамических технических систем бурно развивалась с классической формулы Ф. Фармера $R = QC$, где вероятность исходных событий аварий и катастроф Q и ущерб от них C понимались как множества, а не зависящие аналитически от времени. В настоящее время это выглядит архаично, но в шестидесятые годы прошлого века на учет времени в функции риска не было обращено должного внимания. Хотя уже и тогда четко оговаривалось, что характеристики надежности и безотказности сложных систем суть функции времени. Поэтому в данной статье задача учета фактора времени при моделировании риска R рассматривается как одна из центральных в теории техногенного риска.

Математические модели, позволяющие учитывать фактор времени при прогнозировании техногенного риска

Класс моделей 1. Вероятности исходных событий и ущерба являются случайными функциями времени (случайными процессами), в общем случае как зависимыми, так и независимыми.

Тогда для независимых случайных процессов с распределениями $f_Q(q, t)$ и $f_C(c, t)$

$$R = H_3 \{q, c, t\};$$

$$F_R(r) = \iint_{W_3} f_Q(q, t) f_C(c, t) dq(t) dc(t). \quad (8)$$

Класс моделей 2. Плотности вероятностей исходных событий описываются уравнениями в частных производных.

В классе моделей оценки техногенного риска систем (объектов) целесообразно использовать методы, в которых выходной (комплексный, обобщенный) параметр объекта рассматривается как случайная функция. Для определения вероятности $q_i(t)$ за время t случайный процесс $Y = Y(X, t)$ (X – вектор внешних и внутренних воздействий на объект), далее $Y(t)$ описывается n -мерной плотностью, где число n зависит от значения $t \in T$ скорости изменения случайного процесса $Y(t)$ и требуемой точности расчета. Недостатки этого класса моделей – весьма сложные исходные данные в виде многомерных законов распределения, получение которых проблематично. Использование одномерных плотностей распределения вместо многомерных может существенно исказить результаты расчета. Поэтому в работах [4, 8, 9] при расчетах вероятности $q_i(t)$ было предложено введение дополнительных ограничений на случайный процесс ВПО $Y(t)$.

Пусть $Y(t)$ – непрерывный одномерный однородный марковский процесс с конечным евклидовым фазовым пространством. Как известно, этот процесс описывается функцией $Q(\theta, y, t, Y)$ – вероятность того, что если объект, находящийся в момент времени θ ($\theta > 0$) в состоянии y , то в момент времени t ($t > \theta$) будет находиться в одном из состояний $Y \subset \Omega$, где $\Omega - \theta$ – алгебра подмножеств фазового пространства. Функция $Q(\theta, y, t, Y)$ удовлетворяет известному уравнению Колмогорова – Чепмена, а плотность вероятности перехода $f(\theta, y, t, Y)$ – уравнениям в частных производных (и прямое, и обратное уравнения Колмогорова):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f(\theta, y, t, Y)}{\partial \theta} + \sum_{k=1}^n \alpha_k(\theta, y) \frac{\partial f(\theta, y, t, Y)}{\partial y_k} + \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n \beta_{i,k}(\theta, y) \frac{\partial^2 f(\theta, y, t, Y)}{\partial y_k^2} &= 0; \\ \frac{\partial f(\theta, y, t, Y)}{\partial t} + \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial y_k} [\alpha_k(\theta, y) f(\theta, y, t, Y)] - \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n \frac{\partial^2}{\partial y_i \partial y_k} [\beta_{i,k}(\theta, y) f(\theta, y, t, Y)] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где коэффициенты $\alpha(\theta, y)$ и $\beta^2(\theta, y)$ – коэффициенты сноса и диффузии уравнения соответственно, равные

$$\left. \begin{aligned} \alpha(\theta, y) &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{M[Y(t+\theta) - Y(\theta) |_{Y(\theta)=y}]}{t}; \\ \beta^2(\theta, y) &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{D[Y(t+\theta) - Y(\theta) |_{Y(\theta)=y}]}{t}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для определения коэффициентов $\alpha(\theta, y)$, $\beta^2(\theta, y)$ выражения (10) необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_1(\theta, y)}{\partial \theta} &= \alpha(\theta, y) \frac{\partial m_1(\theta, y)}{\partial y} + \frac{\beta^2(\theta, y)}{2} \cdot \frac{\partial^2 m_1(\theta, y)}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial m_2(\theta, y)}{\partial \theta} &= \alpha(\theta, y) \frac{\partial m_2(\theta, y)}{\partial y} + \frac{\beta^2(\theta, y)}{2} \cdot \frac{\partial^2 m_2(\theta, y)}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где m_1, m_2 – условные математические ожидание и дисперсия ВПО соответственно:

$$m_1(\theta, y) = M[Y(t)] \Big|_{Y(\theta)=y} = \alpha(t) Y = y \int_{-\infty}^{\infty} y dF_y(\theta, y); \quad (12)$$

$$m_2(\theta, y) = M[Y^2(t)] \Big|_{Y(0)=y} = \beta(t)Y - \alpha^2(t)Y^2 = y \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\theta, y)y^2 dy - y^2 \left(\int_{-\infty}^{\infty} y dF_y(\theta, y) \right)^2. \quad (13)$$

Из выражений (12) и (13) видно, что математическое ожидание и дисперсия ВПО являются функциями времени и зависят от вида и значений параметров законов распределений в сечениях случайного процесса $Y(t)$.

Таким образом, *инфинитезимальные характеристики* случайного процесса $Y(t)$ ВПО позволяют определять не только вероятности перехода системы из одного состояния в другое на временном интервале $[t_0, t_k]$, но и вычислять распределение различных функционалов от процесса, в частности, время достижения процессом некоторой области и распределения значения процесса $Y(t)$ в непрерывной области до достижения момента t_k .

**Модели риска с уравнениями в частных производных
при наличии скачков изменения состояния динамических систем**

Класс моделей 3. Следует отметить, что уравнения (9)–(11) являются корректными моделями известных фундаментальных законов сохранения [10]:

$$\frac{\partial f^{(\omega)}(x, z, y, t)}{\partial t} + \sum_{j=1}^n \frac{\partial A_j^{(\omega)}(f, x, z, y, t)}{\partial x_j} = B^{*(\omega)}(f, x, z, y, t), \quad (14)$$

$$x, y, z \in R^n, t > 0, \omega \in \Omega,$$

где $f = \{f^{(\omega)}\}$ – неизвестная вектор-функция (в нашем случае это $q_i(t)$); $x, y, z \in R^n$ – пространственные координаты; A_j и B^* – операторы, считающиеся заданными характером моделируемых физических процессов в объектах; Ω – множество параметров ω , нумерующих уравнения (14).

Законы сохранения вида (14) идеально отображают функционирование объектов, описываемых в общем случае системами нелинейных дифференциальных и интегродифференциальных уравнений.

Для случаев, когда правая часть уравнения (14) имеет разрыв, необходимо переходить к моделям уравнений Лиувилля – Власова [10]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f(z, t)}{\partial t} + \frac{\partial [f(z, t)p(z)]}{\partial z} &= 0; \\ f(z, t) \Big|_{t=0} &= f^0(z), \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где $f(z, t)$ – плотность вероятности распределения состояния системы в фазовом пространстве в момент времени t ; $p(z)$ – поле скоростей изменения состояния системы в фазовом пространстве; $f^0(z)$ – начальная плотность вероятности распределения состояния системы в фазовом пространстве.

Хотя уравнение Лиувилля является уравнением неразрывности и основополагающим законом сохранения, который определяет статистические решения уравнений динамических систем, однако возможны применения этого уравнения и при наличии скачков изменения состояния динамических систем. Иными словами, уравнение Лиувилля – Власова при наличии скачков является решением системы дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Использование уравнения (15) с разрывными коэффициентами под знаком производной влечет возникновение функциональных решений. Установлено в [10], что численное моделирование уравнений типа Лиувилля при наличии разрывных коэффициентов является существенным преимуществом по сравнению с разностными схемами, так как последние в нашем случае не являются аппроксимирующими.

Опыт вычисления значений техногенного риска показывает, что определение ущерба $C_i(t)$ принципиальных трудностей не содержит, за исключением организационных, связанных с субъективными факторами. Большинство проблем возникает при определении значений вероятностей исходных событий отказов, аварий и катастроф. К настоящему времени в теории безопасности разработаны и широко применяются на практике для оценки $q_i(t)$ разнообразные логико-вероятностные модели, основанные на методах типа «дерево отказов – дерево событий», схемах функциональной целостности, общем логико-вероятностном методе, с использованием топологических, логико-графических и других методов. Многие из этих моделей теоретически хорошо

описаны в отечественной и зарубежной литературе. Большинство из них максимально автоматизированы, доведены до реализации на ЭВМ [3, 9, 11] и рекомендованы многими национальными и международными организациями для практических расчетов при выполнении вероятностного анализа безопасности сложных высокоответственных динамических систем. Однако подавляющее число логико-вероятностных методов при расчете безопасности и риска вынуждены использовать характеристики надежности оборудования в виде вероятности или интенсивности отказов. А это связано с решением таких непростых задач, как высокая надежность оборудования, малое число отказов, неоднородность и усеченность выборок, разнородность элементной базы, различие технологических схем и т.д.

Для элементов оборудования с сосредоточенными параметрами проблем получения характеристик надежности существенно меньше, чем для систем с распределенными параметрами.

Возможны и другие формы взаимосвязи между множествами Q , C и T , например, учет предысторий во времени значений техногенного риска и т.д.

Постулаты феномена «время» в теории техногенного риска сложных динамических систем

Постулат, вытекающий из теории марковских процессов. Марковский процесс, процесс без последствия – это случайный процесс, эволюция которого после любого заданного значения временного параметра t не зависит от эволюции, предшествующей t , при условии, что значение процесса в этот момент фиксировано (т.е. «будущее» и «прошлое» процесса не зависят друг от друга при известном «настоящем»). Этот постулат принято называть марковским [12]. Впервые он был сформулирован А. А. Марковым в «Известиях физико-математического общества Казанского университета» (1906, т. 15, № 4, с. 135–156).

Марковские процессы типа броуновского движения тесно связаны с дифференциальными уравнениями параболического типа. Переходная плотность $f(\theta, y, t, Y)$ диффузионного процесса $Y(t)$ удовлетворяет при некоторых дополнительных предположениях прямому и обратному уравнениям Колмогорова (9).

Иными словами, *марковский процесс – это процесс, в котором будущая эволюция состояния объекта зависит только от настоящего текущего состояния.* Для объекта с непрерывным временем это означает, что процесс локален во времени, т.е. эффекты памяти отсутствуют.

Постулат Шеннона. Сложность проблемы прогноза ресурса оборудования СДС состоит не только в том, чтобы построить модель изменения процессов деградации материалов оборудования во времени, адекватную прогнозируемым процессам на интервале предыстории, но и в том, чтобы эта адекватность сохранялась на интервале упреждений. Очевидно, что любой математический аппарат прогнозирования является бесполезным, если не учитывается физическая сущность прогнозируемых процессов. Определение закономерностей изменения физических процессов деградации оборудования СДС в задачах прогнозирования должно базироваться на одном из центральных фундаментальных постулатов физики о сохранении сущности физических процессов при прогнозировании поведения объектов, который был сформулирован К. Шенноном: *основные закономерности, наблюдавшиеся в прошлом, будут сохранены в будущем.* При этом процесс функционирования СДС должен рассматриваться как последовательная смена ее состояний под действием внешних и внутренних факторов (рис. 2).

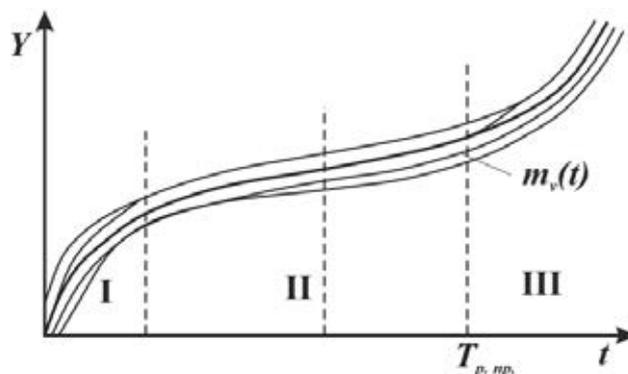


Рис. 2. Характер изменения процессов деградации материалов и оборудования СДС во время эксплуатации:
 $m_y(t)$ – математическое ожидание прогнозируемого ресурса; I – область приработки;
 II – область нормального периода эксплуатации; III – область интенсивного износа и старения

Постулат Седякина. Известно [7, 8], что независимо от вида закона распределения случайной величины наработки объекта вероятность безотказной работы равна

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}, \quad (16)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов объекта.

Правая часть уравнения (16) является функцией интеграла, обозначенного Н. М. Седякиным в [13] через

$$r(t) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \quad r(t) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau. \quad (17)$$

«Величину данного интеграла примем за меру ресурса, выработанного элементом в интервале времени $(0, t)$. Очевидно, что введенное понятие ресурса, выработанного элементом в интервале, времени $(0, t)$, согласуется с нашими интуитивными представлениями. В самом деле, если $t = 0$, то $r(0) = 0$, что отвечает случаю, когда выработанный элементом ресурс равен нулю.

В другом предельном случае, когда заданный элемент безотказно работает неограниченно долго ($t \rightarrow \infty$) и при этом, если функция $\lambda(z)$ неубывающая, то величина $r(t) \rightarrow \infty$. Это означает, что ресурсы элемента не ограничены. В действительности же заданный элемент способен проработать конечное время $\tau^* = \tau$, и при этом полный его ресурс

$$r(\tau) = \int_0^{\tau} \lambda(z) dz, \quad (18)$$

где τ – время безотказной работы объекта.

Поскольку время безотказной работы объекта не может быть заранее предсказано однозначно, полный его ресурс представляет собой случайную величину.

Под режимом работы элемента понимают степень его нагруженности

$$\varepsilon = \frac{H}{H_0}, \quad (19)$$

где H и H_0 – действующая и номинальная нагрузки элемента.

В зависимости от величины ε функция $w(\tau)$ может, вообще говоря, изменяться в широких пределах. Однако если $r(\tau)$ найдена при некотором значении ε , то интенсивность отказа объекта согласно (16)–(17) будет представлять собой вполне определенную функцию

$$\lambda(t) = \lambda(t, \varepsilon), \quad (20)$$

где ε – находится из условия (19).

Примерная зависимость $\lambda(t, \varepsilon)$ от t для различных значений ε представлена на рис. 3.

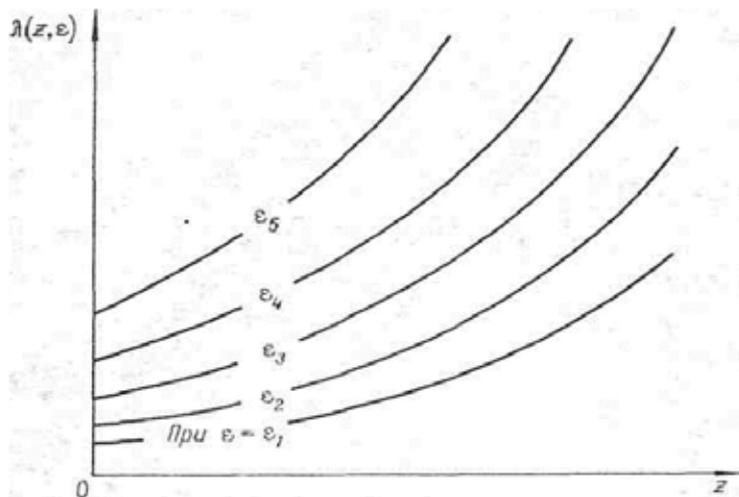


Рис. 3. Примерные зависимости опасностей отказов элемента от времени при условиях его работы $\varepsilon_k, k = 1, 2, 3, \dots$

Опираясь на введенное понятие ресурса $r(t)$, представляется возможным сформулировать один из законов теории надежности – постулат Н. М. Седякина, суть которого заключается в следующем: *надежность объекта зависит от величины выработанного им ресурса в прошлом и не зависит от того, как выработан этот ресурс* [13], т.е.

$$P\left(\frac{t}{r}\right) = p^{(1)}\left(\frac{t}{t_1}\right) = p^{(2)}\left(\frac{t}{t_2}\right), \quad (21)$$

где t_1 и t_2 – удовлетворяют интегральному соотношению

$$r = \int_0^{t_1} \lambda(z, \varepsilon_1) dz = \int_0^{t_2} \lambda(z, \varepsilon_2) dz. \quad (22)$$

Прежде всего следует отметить, что если этот закон справедлив, то область его применимости должна быть ограничена теми физическими процессами, которые не приводят к качественному изменению структуры материалов объекта. При соблюдении этого условия естественно ожидать, что надежность объекта в будущем должна зависеть от величины ресурса, выработанного им в прошлом. При этом левая часть равенства (22) выражает собой ресурс, выработанный объектом за время x_1 в условиях $\varepsilon = \varepsilon_1$, а правая – ресурс, выработанный объектом за время x_2 в условиях ε_2 . Кроме того, следует иметь в виду, что соотношения (21) и (22), являясь статистическими, выражают собой закономерности поведения объекта в массовом смысле» [12].

Постулат Ляпунова. Для определения поведения хаотических динамических систем понятие траектории утрачивает смысл через некоторое характерное время (время Ляпунова) [14]. Под хаосом будем понимать поведение системы, при котором первоначально близкие траектории экспоненциально разбегаются со временем. При этом режим называется хаотическим, если расстояние между любыми двумя точками первоначально сколь угодно малое экспоненциально возрастает со временем. Постулат А. М. Ляпунова формулируется следующим образом: *разбегание траекторий описывается функцией $\exp(t/\tau)$, где $1/\tau$ – для хаотических систем по определению положительная величина.* Величина $1/\tau$ называется показателем Ляпунова, а само τ – временем Ляпунова [14].

Постулаты Пригожина. Существуют три формы законов природы:

- 1) первая форма законов оперирует траекториями в классической механике и волновыми функциями в квантовой механике (И. Ньютон);
- 2) вторая форма законов – статистическая формулировка законов природы (Дж. Гиббс, А. Эйнштейн), она «приводима» или «сводима»;
- 3) третья формулировка законов природы: законы хаоса носят вероятностный характер, но недостоверный.

Законы, управляющие поведением устойчивых систем, детерминистичны и обратимы во времени. И, наоборот, законы, описывающие хаотические системы, соответствуют вероятностям и включают в себя необратимость.

Эволюция хаотических систем во времени требует несводимого вероятностного описания, причем в терминах ансамблей и распределения вероятностей. Эволюцию распределения вероятностей надлежит описывать в пространстве, которое зависит от времени.

Решение парадокса времени возможно только потому, что пространство становится «темпорализованным», поскольку прошлое и будущее играют не одну и ту же роль.

Теперь можно сформулировать постулаты И. Р. Пригожина:

1. Хаос приводит к включению стрелы времени в фундаментальное динамическое описание поведения системы. Эволюция систем при $t \rightarrow +\infty$ и при $t \rightarrow -\infty$ различна.
2. Все системы, допускающие несводимое вероятностное описание, считаются хаотическими.
3. Законы, описывающие хаотические системы, соответствуют вероятностям и включают в себя необратимость [15–18].

Заключение

1. Сложные динамические системы, как правило, имеют длительный жизненный цикл. Поэтому чрезвычайно важной задачей теории техногенного риска является разработка и развитие методов и моделей прогнозирования изменения во времени количественных значений риска.

2. В статье приведены три класса моделей прогнозирования техногенного риска, которые, на взгляд авторов, являются наиболее перспективными в задаче, указанной выше в п. 1.

3. Аварии и катастрофы характерны для таких критически важных сложных динамических объектов, к которым относятся ядерные энергетические установки, летательные аппараты, системы транспорта углеводородов, химико-технологические установки и другое, часто переходящие из одного состояния в другое в небольшой промежуток времени. Поэтому в статье большое внимание уделено развитию моделей техногенного риска, описываемых системами нелинейных дифференциальных и интегродифференциальных уравнений при наличии скачков и разрывных коэффициентов.

4. Важным достоинством статьи является то, что в ней, по-видимому, впервые четко сформулированы постулаты, позволяющие вести дальнейшую разработку феномена «время» в теории техногенного риска, как одного из основополагающих разделов современной математической теории безопасности критически важных объектов.

Список литературы

1. Королев, В. Ю. Математические основы теории риска : учеб. пособие / В. Ю. Королев, В. Е. Бенинг, С. Я. Шоргин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544 с.
2. Острейковский, В. А. Математическое моделирование техногенного риска / В. А. Острейковский, А. О. Генюш, Е. Н. Шевченко ; Сургут. гос. ун-т ХМАО – Югры. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2010. – 96 с.
3. Острейковский, В. А. Количественная оценка риска в техногенной безопасности сложных динамических систем : моногр. / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко, В. С. Микшина // Итоги науки : избр. тр. междунар. симп. по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – М. : РАН, 2013. – Т. 1. – С. 12–31.
4. Острейковский, В. А. О некоторых классах моделей риска в теории техногенной безопасности / В. А. Острейковский // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 46–49.
5. Муравьев, И. И. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1 – С. 24–27.
6. Острейковский, В. А. Время как фактор в теории техногенного риска / В. А. Острейковский, И. И. Муравьев, Е. Н. Шевченко // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий «ИНФО-2015» : тр. Междунар. науч.-практ. конф. (Сочи, 1–10 октября 2015) / под общ. ред. С. У. Увайсова. – М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2015. – С. 217–222.
7. Острейковский, В. А. Многофакторные испытания на надежность / В. А. Острейковский. – М. : Энергия, 1978. – 152 с.
8. Острейковский, В. А. Теория надежности : учеб. для вузов / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2003. – 463 с.
9. Острейковский, В. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 353 с.
10. Галкин, В. А. Анализ математических моделей: системы законов сохранения, уравнения Больцмана и Смолуховского / В. А. Галкин. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 408 с.
11. Острейковский, В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели : моногр. / В. А. Острейковский. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2013. – 320 с.
12. Математическая энциклопедия. – М. : Советская энциклопедия, 1982. – Т. 3. – С. 523–530.
13. Седакин, Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности и некоторые ее приложения / Н. М. Седакин. – Л. : Изд-во ЛКВИА им. А. Ф. Можайского, 1965. – 41 с.
14. Ляпунов, А. М. Собрание сочинений / А. М. Ляпунов. – М. ; Л., 1956. – Т. 2. – 263 с.
15. Пригожин, И. Время. Хаос. Квант: К решению парадокса времени / И. Пригожин, И. Стенгерс ; пер. с англ. под ред. В. И. Аршинова. – Изд. 8-е. – М. : Едиториал УРСС, 2014. – 240 с.
16. Пригожин, И. Р. От классического хаоса к квантовому / И. Р. Пригожин // Природа. – 1993. – № 12. – С. 13–23.
17. Жакот, А. Д. Математические модели регрессионного анализа и теории катастроф синдрома дыхательных путей / А. Д. Жакот, В. А. Острейковский, Е. В. Челнокова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2005. – Т. 1. – С. 467–472.
18. Ostreikovsky V. A. Mathematical Models for Quantitative Estimation of Object Reliability with Catastrophe Theory Bifurcational Set Methods Applied / V. A. Ostreikovsky, A. S. Fedorov // Second International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR'2000): Methodology, Practice and Inference (Bordeaux, France, June 4–7). – Bordeaux, 2000. – Vol. 2. – P. 841–842.

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628400, Россия, г. Сургут, проспект Ленина, д. 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Шевченко Елена Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628400, Россия, г. Сургут, проспект Ленина, д. 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Аннотация. Дается обзор полученных моделей техногенного риска, учитывающих развитие во времени различных факторов, влияющих на сложную систему. Результаты могут быть применены при проектировании и анализе безопасности технических систем. Показано, что для адекватного описания сложных динамических систем, к которым относятся ядерные энергетические установки, летательные аппараты, системы транспорта углеводородов, химико-технологические установки и другие, с помощью теории вероятностей необходимо определить такие свойства, как непредсказуемость, воспроизводимость, устойчивость частот. Разработана классификация моделей техногенного риска сложных динамических систем, в которых эти системы имеют длительный жизненный цикл. Показано, что важной задачей теории техногенного риска является разработка и развитие методов и моделей прогнозирования изменения во времени количественных значений риска. Приведены три класса моделей прогнозирования техногенного риска, которые, на взгляд авторов, являются наиболее перспективными. Большое внимание уделено развитию моделей техногенного риска, описываемых системами нелинейных дифференциальных и интегродифференциальных уравнений при наличии скачков и разрывных коэффициентов.

Ключевые слова: моделирование систем, техногенный риск, постулаты времени.

УДК 519.87

Острейковский, В. А.

Феномен «время» в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 3–12. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-1.

Ostrejkovski Vladislav Alekseevich

doctor of technical science, professor,
sub-department of information theory
and computer technology,
Surgut State University
(628400, 1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Shevchenko Elena Nikolaevna

candidate of physics and mathematics,
associate professor,
sub-department of information theory
and computer technology,
Surgut State University
(628400, 1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Abstract. The article provides an overview of the obtained technical risk models that take into account various factors in the development of time, affecting the complex system. The results can be applied in the design and analysis of the safety of technical systems. It is shown that for an adequate description of complex dynamic systems which include nuclear power plants, aircraft, transport system of hydrocarbons, chemical processing plants and others. With the help of probability theory needed to determine properties such as unpredictability, reproducibility, stability of frequency. The classification of technogenic risk models of complex dynamic systems in which these systems have a long life cycle. It has been shown that an important task of man-made theory of risk is the design and development of methods and models to predict changes over time quantitative risk values. The paper presents three classes of technogenic risk prediction models, which, in the opinion of the authors, are the most promising. Much attention is paid to the development of technical risk models described by systems of nonlinear differential and integral-differential equations with jumps and discontinuous coefficients.

Key words: modeling of systems, technological risk, time postulates.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

З. М. Селиванова, Т. А. Хоан

На производственных предприятиях при изготовлении теплоизоляционных, композитных, строительных и других материалов, а также изделий из них широко применяются информационно-измерительные системы (ИИС) для измерения и неразрушающего контроля (НК) параметров теплофизических свойств (ТФС) выпускаемой продукции. Необходимое условие точного и достоверного контроля параметров ТФС материалов ($Q_{ТФС}$) при воздействии дестабилизирующих факторов ($Q_{ДФ}$) – это обеспечение надежности функционирования структурных компонентов ИИС [1]. Поэтому повышение вероятности безотказной работы информационно-измерительной системы является важной и актуальной задачей.

Эффективность функционирования ИИС определяют основные характеристики: надежность, быстродействие, достоверность измерительной информации, метрологические характеристики. Надежность – важнейшая характеристика ИИС, при оценке которой учитываются среднее время восстановления компонентов системы, вероятность восстановления в течение заданного времени, средняя наработка системы на отказ, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы [2, 3].

Выполним оценку надежности ИИС НК ТФС материалов и рассмотрим направления повышения надежности системы при воздействии основных дестабилизирующих факторов – температуры и влажности окружающей среды.

Анализ функционирования ИИС показывает, что большинство отказов происходят в результате нарушения работоспособности структурных компонентов ИИС при влиянии ДФ: системы измерительных преобразователей (СИП) – датчиков температуры (термопар), коммутатора каналов (КК), системы дифференциальных усилителей (СДУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), блока управления нагревом (БУН), микроконтроллера (МК) [1]. Структурная схема ИИС НК ТФС материалов представлена на рис. 1.

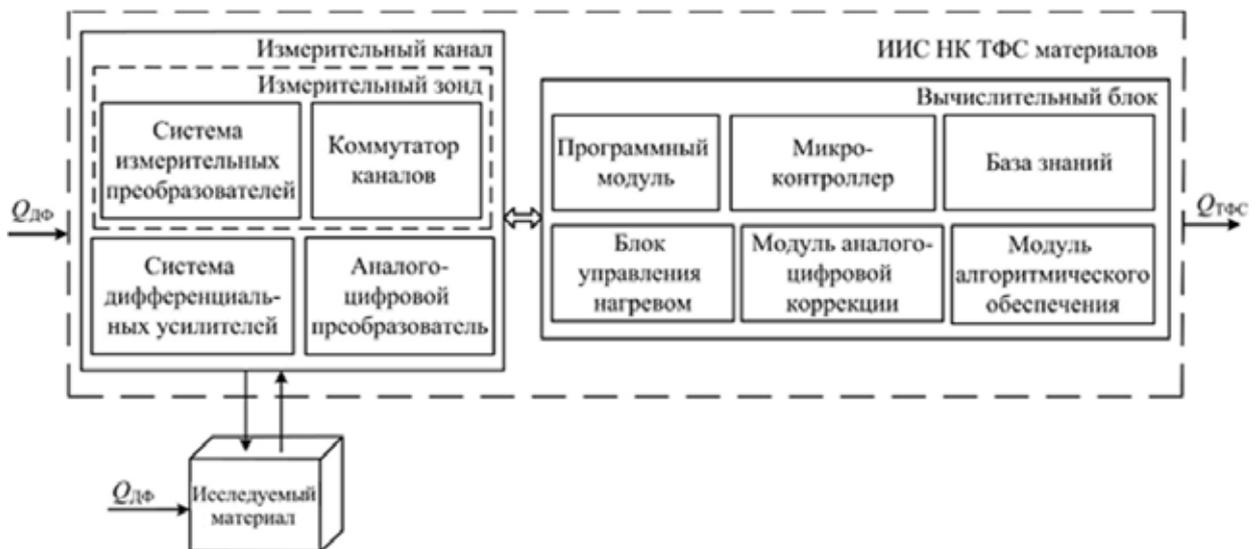


Рис. 1. Структурная схема ИИС НК ТФС материалов

Принцип действия ИИС заключается в импульсном тепловом воздействии измерительного зонда (ИЗ) на исследуемый материал (ИМ) с последующей регистрацией температурно-

временных характеристик в области контакта ИЗ и ИМ, данные которых записываются в базу знаний (БЗ) ИИС и используются для расчета определяемых параметров ТФС материалов.

Среднее время безотказной работы информационно-измерительной системы – основной показатель надежности ИИС. Время безотказной работы зависит от надежности структурных компонентов системы и рассчитывается по методике оценки надежности многокомпонентных систем.

Выполнен расчет показателей надежности предложенной ИИС ТФС материалов. Для расчета показателей надежности принимается средняя наработка до отказа структурных компонентов системы:

- а) системы измерительных преобразователей – $N_{СИП} = 20\ 000$ ч;
- б) коммутатора каналов – $N_{КК} = 140\ 000$ ч;
- в) дифференциального усилителя – $N_{СДУ} = 21\ 000$ ч;
- г) аналого-цифрового преобразователя – $N_{АЦП} = 120\ 000$ ч;
- д) блока управления нагревом – $N_{БУН} = 100\ 000$ ч;
- е) микроконтроллера PIC 18F8720 – $N_{МК} = 175\ 000$ ч.

Проведен расчет вероятностей безотказной работы для ИИС НК ТФС материалов. При экспоненциальном законе распределения времени до отказа вероятность безотказной работы одного структурного компонента ИИС рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го компонента, 1/ч; t – время, при расчете принимается $t = 2000$ ч.

Интенсивность отказов i -го компонента определяется по формуле [3]

$$\lambda_i = \frac{1}{N_i}. \quad (2)$$

В соответствии с формулами (1) и (2) выполнен расчет интенсивности отказов и вероятности безотказной работы структурных компонентов ИИС.

Интенсивность отказов датчика температуры:

$$\lambda_{СИП} = \frac{1}{20\ 000} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (3)$$

Вероятность безотказной работы датчика температуры за время $t = 2000$ ч:

$$P_{СИП}(t) = e^{(-5 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,904. \quad (4)$$

Интенсивность отказов коммутатора каналов:

$$\lambda_{КК} = \frac{1}{140\ 000} = 7,14 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы коммутатора каналов за 2000 ч:

$$P_{КК}(t) = e^{(-7,14 \cdot 10^{-6}) \cdot 2000} = 0,986. \quad (6)$$

Интенсивность отказов дифференциального усилителя:

$$\lambda_{СДУ} = \frac{1}{21\ 000} = 4,76 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы дифференциального усилителя:

$$P_{СДУ}(t) = e^{(-4,76 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,909. \quad (8)$$

Интенсивность отказов аналого-цифрового преобразователя:

$$\lambda_{АЦП} = \frac{1}{120\ 000} = 8,33 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (9)$$

Вероятность безотказной работы аналого-цифрового преобразователя:

$$P_{\text{АЦП}}(t) = e^{(-8,33 \cdot 10^{-6}) \cdot 2000} = 0,984. \quad (10)$$

Интенсивность отказов блока управления нагревом:

$$\lambda_{\text{БУН}} = \frac{1}{100\,000} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (11)$$

Вероятность безотказной работы блока управления нагревом:

$$P_{\text{БУН}}(t) = e^{(-1 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,98. \quad (12)$$

Интенсивность отказов микроконтроллера:

$$\lambda_{\text{МК}} = \frac{1}{175\,000} = 0,57 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (13)$$

Вероятность безотказной работы микроконтроллера:

$$P_{\text{МК}}(t) = e^{(-0,57 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,989. \quad (14)$$

Проведен расчет показателей надежности ИИС НК ТФС материалов с учетом интенсивности отказов и вероятности безотказной работы структурных компонентов ИИС. Вероятность безотказной работы системы с последовательной организацией структурных компонентов системы за 2000 ч работы определяется по следующей зависимости [4, 5]:

$$P_{\text{ИИС}}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (15)$$

где n – число последовательно соединенных структурных компонентов ИИС НК ТФС материалов.

В соответствии (15) вероятность безотказной работы ИИС НК ТФС материалов

$$P_{\text{ИИС}}(t) = P_{\text{СИП}}(t) \cdot P_{\text{КК}}(t) \cdot P_{\text{СДУ}}(t) \cdot P_{\text{АЦП}}(t) \cdot P_{\text{БУН}}(t) \cdot P_{\text{МК}}(t), \quad (16)$$

$$P_{\text{ИИС}}(t) = 0,904 \cdot 0,986 \cdot 0,909 \cdot 0,984 \cdot 0,98 \cdot 0,989 = 0,77. \quad (17)$$

Как показывают расчеты (3) – (17), вероятность безотказной работы ИИС за 2000 ч составляет всего 0,77, что является низким показателем, по сравнению с требуемым для данного класса измерительных средств – не менее 0,92.

Для повышения надежности системы используют основные методы самоконтроля системы: тестового контроля программным методом и аппаратного контроля. При тестовом самоконтроле проверяются компоненты системы, осуществляющие обработку измерительной информации. При аппаратном самоконтроле применяется измерительная аппаратура для проверки функционирования структурных компонентов системы. Для безотказной работы структурных компонентов и повышения надежности ИИС предлагается применить в системе поэлементное резервирование, реализуемое для тех структурных компонентов измерительного канала (ИК) ИИС, которые с большей вероятностью могут отказать в процессе функционирования системы. Как показывают результаты проверки их отказоустойчивости, наиболее подвержены отказам в работе подсистемы измерительных преобразователей и дифференциальных усилителей. Резервирование осуществляется по параллельной, наиболее эффективной схеме (рис. 2).

В случае отказа СИП или СДУ автоматически подключается параллельно включенный исправный элемент. Работоспособность СИП и СДУ определяется перед началом процесса измерения в системе в соответствии с алгоритмом тестового самоконтроля компонентов программным методом на соответствие уровня их выходных сигналов заданным допустимым значениям.

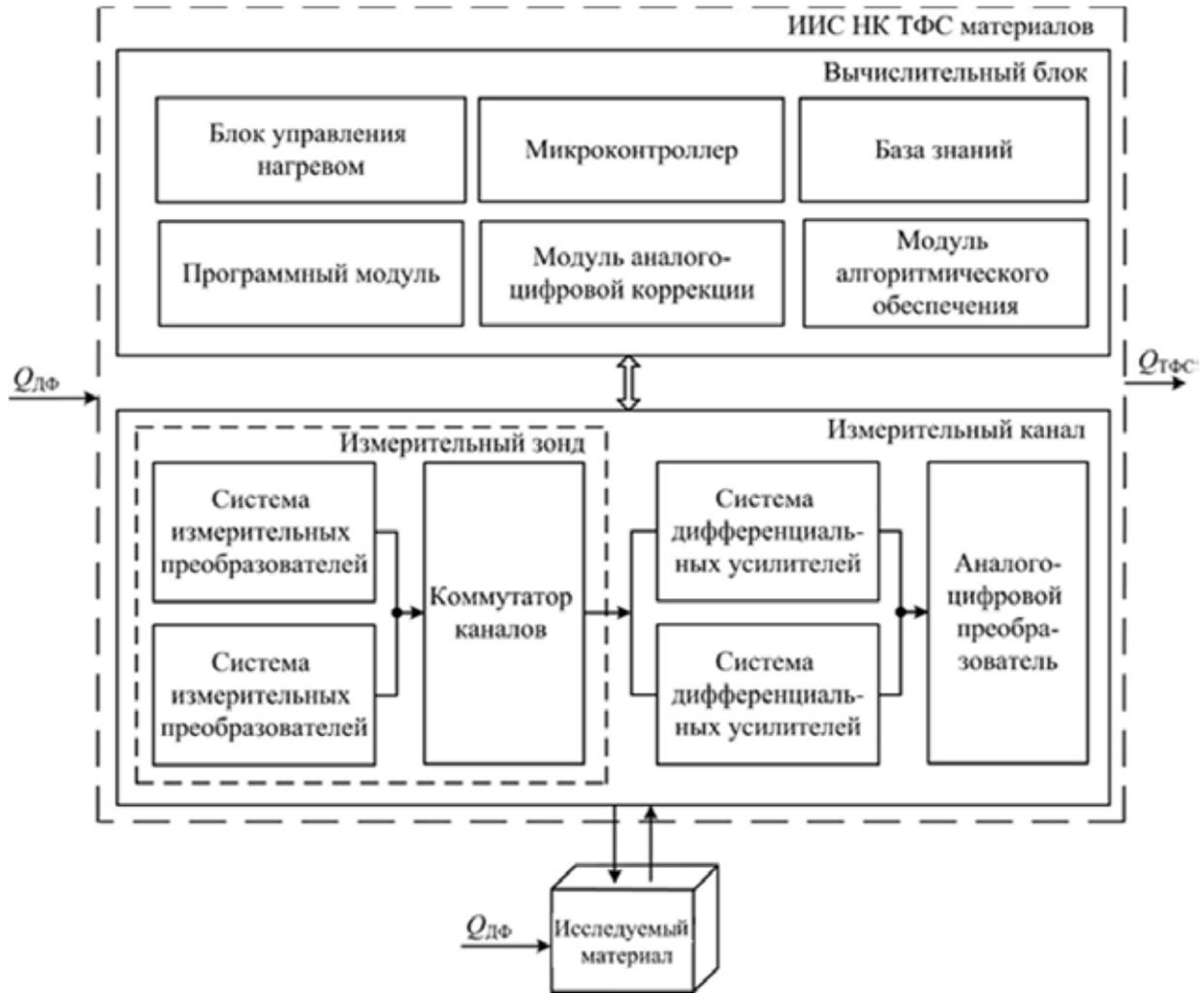


Рис. 2. Структурная схема ИИС ТФС материалов с резервированием структурных компонентов

Вероятность безотказной работы резервной структуры (РС) компонентов ИИС при их параллельном соединении рассчитывается по формуле [4, 5]

$$P_{\text{РС ИИС}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)], \quad (18)$$

где m – число параллельно включенных структурных компонентов ИК ИИС.

Вероятность безотказной работы параллельно включенных компонентов СИП определяется по формуле

$$P_{\text{РС СИП}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,904) = 0,991. \quad (19)$$

Вероятность безотказной работы параллельно включенных компонентов СДУ рассчитывается по выражению

$$P_{\text{РС СДУ}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,909) = 0,992. \quad (20)$$

Вероятность безотказной работы ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием СИП – датчиков температуры, и СДУ определяется следующим образом:

$$P_{\text{РС ИИС}}(t) = 0,991 \cdot 0,986 \cdot 0,992 \cdot 0,984 \cdot 0,98 \cdot 0,989 = 0,92. \quad (21)$$

Интенсивность отказов ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием равна

$$\lambda_{PC \text{ ИИС}} = -\frac{\ln 0,92}{2000} = 4,17 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Средняя наработка до отказа ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием рассчитывается по формуле:

$$N_{C \text{ ИИС}} = \frac{1}{\lambda_{PC \text{ ИИС}}} = \frac{1}{4,17 \cdot 10^{-5}} = 23\,980 \text{ ч}.$$

Как следует из анализа результатов расчетов (18)–(21), при параллельном резервировании структурных компонентов измерительного канала ИИС – СИП и СДУ, имеющих низкую вероятность безотказной работы по сравнению с другими компонентами ИК ИИС, вероятность безотказной работы системы повысилась с 0,77 до 0,92, что свидетельствует о повышении надежности ИИС.

В случае несоответствия определяемых параметров ТФС материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности – λ , α) области допустимых значений (доп.) проводится их коррекция по аппроксимирующим зависимостям, представленным в базе знаний ИИС в соответствии с разработанным алгоритмом коррекции (рис. 3).

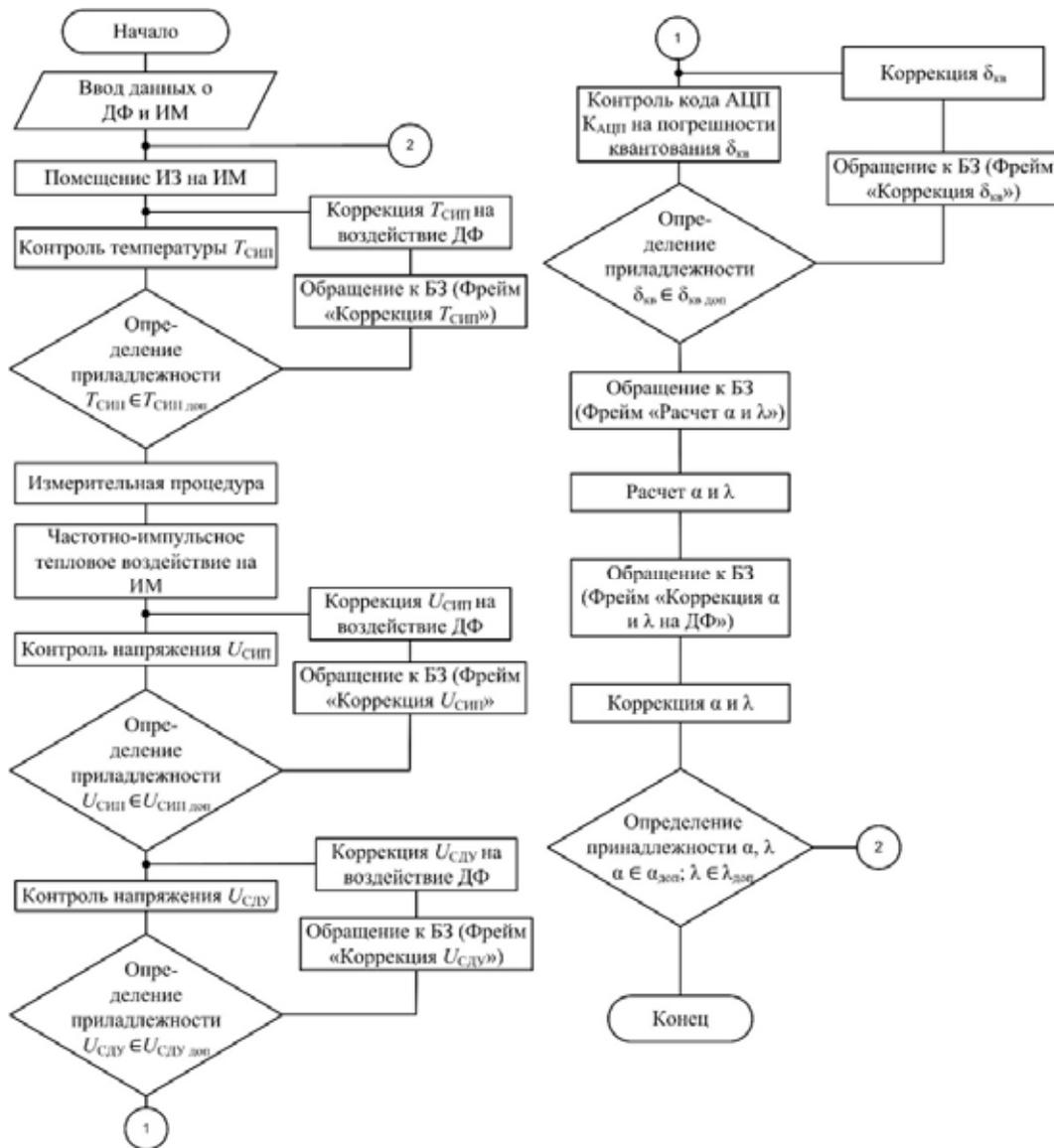


Рис. 3. Блок-схема алгоритма функционирования ИИС НК ТФС материалов и коррекции ее технического несовершенства

Проведены экспериментальные исследования ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием структурных компонентов измерительного канала ИИС – СИП и СДУ. Выполнена обработка результатов измерения и метрологический анализ результатов измерения параметров ТФС твердых материалов информационно-измерительной системой [6]. Результаты определения коэффициентов тепло- и температуропроводности эталонных материалов – полиметилметакрилата (ПММ) и рипора, строительных материалов – бетона и цемента, а также относительной погрешности измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Эталонные и измеренные значения λ и a материалов, погрешность измерения

Материал объекта	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δ_a , %	δ_λ , %
ПММ	1,09	0,195	1,10	0,198	1,00	1,54
Рипор	4,61	0,028	4,66	0,0283	1,08	1,07
Бетон	1,58	0,54	1,64	0,56	3,79	3,70
Цемент, затвердевший (в результате коллоидации)	0,86	0,84	0,89	0,87	3,49	3,57

Данные экспериментальных исследований ИИС и метрологического анализа результатов измерений параметров ТФС материалов позволяют сделать вывод, что точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности соответствует допустимым значениям для данного класса средств измерений с учетом погрешности метода определения ТФС материалов и изделий. Относительная погрешность измерения λ и a составляет не более 4 %.

Выводы

1. Предложенный алгоритм коррекции результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям результатов определения ТФС материалов при воздействии ДФ для получения параметров ТФС материалов с допустимой погрешностью способствует повышению устойчивости системы к ошибочным измерениям, а следовательно, обеспечению надежности ИИС ТФС материалов.

2. Повышение надежности ИИС НК ТФС материалов достигнуто в результате повышения вероятности безотказной работы структурных компонентов измерительного канала системы, тестового контроля структурных компонентов ИК системы программным методом и аппаратного контроля при реализации алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС НК ТФС материалов.

3. Введение системы резервирования основных структурных компонентов ИИС, которые в большей степени подвержены отказам в работе, позволяет повысить вероятность безотказной работы ИИС ТФС материалов с 0,77 до 0,92 и, следовательно, повысить достоверность получаемой измерительной информации, точность контроля ТФС материалов и в результате качество выпускаемой продукции.

Список литературы

1. Селиванова, З. М. Повышение точности информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Измерительная техника. – 2015. – № 9. – С. 45–48.
2. Александрович, А. Е. Проектирование высоконадежных информационно-вычислительных систем / А. Е. Александрович, Ю. В. Бородакий, В. О. Чуканов. – М. : Радио и связь, 2004. – 144 с.
3. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004984>
4. Шкляр, В. Н. Надежность систем управления : учеб. пособие / В. Н. Шкляр ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. – 126 с.
5. Полтавский, А. В. Модель отказов автоматизированных средств контроля / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 63–67.
6. Чернышова, Т. И. Информационно-аналитическая система оценки метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2011. – № 1. – С. 79–82.

Селиванова Зоя Михайловна

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования радиоэлектронных
и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 116)
E-mail: Selivanova@mail.jesby.tstu.ru

Хоан Туан Ань

аспирант,
Тамбовский государственный
технический университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 116)
E-mail: futurevip1608@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Информационно-измерительная система осуществляет неразрушающий контроль и измерение параметров теплофизических свойств твердых материалов и изделий – строительных, полимерных, теплоизоляционных и других, от которых зависит качество выпускаемой продукции на производстве. Нарушение работоспособности отдельных структурных компонентов измерительного канала системы приводит к изменению достоверности получаемой измерительной информации и увеличению погрешности определяемых на ее основе параметров теплофизических свойств материалов. Данная ситуация относится к отказу информационно-измерительной системы. *Материалы и методы.* Исследование работоспособности информационно-измерительной системы и ее структурных компонентов проводится с использованием классической теории оценки надежности информационно-измерительных систем и разработанного алгоритма коррекции технического несовершенства информационно-измерительной системы. *Результаты.* Введена система параллельного резервирования основных структурных компонентов измерительного канала системы и реализован алгоритм коррекции их технического несовершенства, что позволило повысить вероятность безотказной работы информационно-измерительной системы параметров теплофизических свойств материалов. *Выводы.* Повышение надежности информационно-измерительной системы обеспечивает достоверность получаемой измерительной информации, точность определяемых параметров теплофизических свойств материалов, что способствует повышению качества при их производстве.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, надежность, теплофизические свойства материалов, параллельное резервирование.

Selivanova Zoia Mikhailovna

doctor of technical science, professor,
sub-department of design of electronic
and microprocessor systems,
Tambov Technical State University
(392000, 116 Sovietskaia street, Tambov, Russia)

Hoang Tuan Anh

postgraduate student,
Tambov Technical State University,
(392000, 116 Sovietskaia street, Tambov, Russia)

Abstract. *Background.* Information-measuring system carries out non-destructive control and measurement of the parameters of thermal properties of solid materials and products – construction, plastic, thermal insulation and other that affect the quality of products in production. Violation of the performance of individual structural components of the measuring channel system leads to changing the reliability of the resulting measurement information and increasing uncertainty determined on the basis of its thermo-physical properties of materials parameters. This situation relates to the refusal of information-measuring system. *Materials and methods.* Research performance information measurement system and its structural components is carried out using the classical theory of evaluating the reliability of information and measurement systems and correction algorithm developed technical imperfections of information-measuring system. *Results.* Introduced system of parallel redundancy of the main structural components of measurement system channel and correction algorithm for their technical imperfections, which allowed to increase the reliabilities of information-measuring system of thermal properties of materials parameters. *Conclusions.* Improving the reliability of information-measuring system ensures the reliability of the measurement information, the accuracy of the determined parameters of thermal properties of materials that contribute to the quality in their production.

Key words: information-measuring system, reliability, thermal properties of materials, parallel redundancy.

УДК 621.396.6-027.31; 621.396:658.512.2

Селиванова, З. М.

Оценка надежности информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 13–19. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-2.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА: УПРАВЛЕНИЕ ЗАМЕЩЕНИЕМ КРИТЕРИЯ

А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков

Разработка практических методов и моделей принятия управленческих решений для современных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) (в заданных лицом, принимающим решения, ЛПР) является актуальной проблемой. Математическая теория и концепция принятия решений относятся к наиболее интенсивно развивающимся в настоящее время направлениям системного синтеза и анализа различных сложных технических систем (СТС). Принятие управленческих решений при разработке и оценках основных показателей качества и эффективности новых моделей и объектов СТС является сложным творческим процессом, часто носящим итеративный характер. В этом процессе следует выделить следующие компоненты для моделирования объектов ИИУС [1–4]:

- выдвижение целей (задач);
- поиск альтернатив способов их достижения;
- логику выбора альтернатив;
- обоснование показателей и критериев выбора;
- анализ решений (анализ возможных последствий-исходов принимаемых решений).

При этом в результате анализа решений в моделях и структурах ИИУС могут быть модифицированы или отвергнуты первоначально выдвинутые идеи, цели, а также найдены новые альтернативы, т.е. изменена логика выбора. При разработке современных ИИУС и использовании математических моделей для принятия решений, например моделей математического программирования, когда альтернативы представляют собой множество (континуум) допустимых решений, а оптимальное решение соответствует некоторому экстремуму целевой функции, вопрос об анализе последствий как таковых не ставится. Наблюдаемая сегодня определенная увлеченность математическими моделями принятия решений оставляет за сценой непосредственно сам анализ решений. А такой анализ особенно важен для слабо структурированных проблем в ИИУС, когда трудно или почти невозможно использовать чисто математические модели, а принимаемые решения ЛПР и их качество определяются интуицией человека. Поэтому следует рассматривать подход к такому процессу в следующей логической связке. Пусть всякое возможное действие, отвечающее той или иной альтернативе, порождает последствия, характеризуемые определенным набором свойств, показателей и критериев. Выбирается та альтернатива, последствия которой обладают наиболее предпочтительным набором выделенных свойств. Поэтому в конечном итоге анализ решений выступает в качестве необходимого и достаточно важного элемента в процессе принятия управленческих решений. Применяемые показатели качества продукции, характеристики и свойства или, иначе говоря, используемые критерии могут быть как качественными, так и количественными. Известно, что теория принятия управленческих решений ЛПР в основном базируется для количественных показателей. Если поставленная цель и какие-либо из показателей имеют качественный характер, то имеет смысл вводить так называемые критерии-«заместители», значения которых позволяли бы адекватно описать сам процесс изменения качественного критерия. Если используются функции эффективности, когда компоненты векторов детерминированы, то в качестве критерия выступает определенное условие максимизации этой функции при наложенных дополнительных ограничениях. В данном случае задача поиска лучшей альтернативы сводится к задаче математического программирования. В случае использования функции эффективности, когда оцениваемые компоненты являются случайными переменными, делается допущение, что наилучшей является альтернатива, обладающая максимальным значением математического ожидания полезности возможных результатов. Поэтому, естественно, здесь всегда остается открытым вопрос, который следует решать каждый раз в конкретной ситуации. Здесь надо заметить, что в определенных ситуациях более пригодной в автоматизированной ИИУС мо-

жет оказаться логика выбора, основанная на максимизации гарантированного результата, а не среднего ожидаемого результата [5, 6].

Количественные оценки средних значений полезности сравниваемых альтернатив, несомненно, представляют значительный интерес при использовании гарантированного результата. Причинно-следственные связи в ИИУС между альтернативными действиями и показателями, характеризующими их последствия, а также взаимосвязи между показателями устанавливаются в результате построения соответствующих моделей, в том числе и имитационных. При построении функции эффективности следует исходить из взаимной независимости критериев с точки зрения предпочтительности их возможных значений. Степень взаимной независимости и условия компенсации (замещения) одних критериев другими приводят к различным классам функции эффективности: аддитивным, мультикативным, полилинейным. Допущения, связанные с ограничениями относительно взаимной независимости критериев в ИИУС, несколько сужают область применимости полученных результатов, но тем не менее для достаточно широкого круга задач такие допущения могут оказаться вполне приемлемыми. Кроме того, в этих случаях значительно упрощаются как процедуры построения самих функции эффективности, так и методы проверки оправданности использования функции эффективности подобного вида.

Созданные в настоящее время математические модели и имеющиеся ЭВМ для ИИУС позволяют проводить многовариантную проработку различных планов. В связи с этим предварительный анализ возможных вариантов и отсеивание тех из них, которые являются неудовлетворительными не поддающихся формализации, соображений и критериев, представляется целесообразным проводить в ИИУС с использованием квантификации предпочтений. Заметим, что многомерные функции эффективности особенно удобно применять при анализе и выборе решений, работая с ЭВМ в диалоговом режиме. Также следует отметить, что анализ сложных проблем связан с обработкой большого объема информации. Методы многомерной оценки эффективности в автоматизированной ИИУС позволяют учесть присущую анализируемым решениям неопределенность, оказываются также удобными с точки зрения структуризации и агрегирования информации, так как глубокое изучение проблемы влечет за собой подробную детализацию, что в свою очередь ведет к быстрому разрастанию объема данных, относящихся к проблеме. С другой стороны, сокращая непосредственно сам объем информации, вносится дополнительная неопределенность. В результате этого появляются два вида неопределенности в автоматизированной ИИУС: первый вид связан с возможностью осуществления на рассматриваемом отрезке времени неконтролируемых событий, а второй вид – с неопределенностью, непосредственно вносимой в результате агрегирования данных. Исследования возможности взаимной компенсации значений различных критериев или, иначе говоря, возможности «замещения по эффективности» являются актуальными. В математической формулировке (или постановке) это выглядит следующим образом: обозначим через w допустимую альтернативу и через W множество всех допустимых альтернатив. Каждому действию w из W поставим в соответствие m числовых показателей $J_{1(w)}, \dots, J_{m(w)}$. Можно считать, что m показателей J_1, \dots, J_m отображают каждое w из W в точку m -мерного пространства исходов (последствий) действий, как показано на рис. 1. Очевидно, что во всякой точке (J_1, J_2, \dots, J_m) пространства последствий невозможно непосредственно сравнивать величины J_i и J_j при $i \neq j$, так как в большинстве случаев это было бы просто бессмысленно, поскольку компоненты J_i и J_j могут измеряться в совершенно разных единицах. Задача состоит в таком выборе w из W , чтобы получить в наибольшей мере устраивающий результат $J_{1(w)}, \dots, J_{m(w)}$. Здесь нужна некоторая функция оценки, которая сводила бы совокупность как $J_{1(w)}, \dots, J_{m(w)}$ в скалярный показатель предпочтительности. В такой формулировке это равносильно заданию скалярной функции $J(J_1, J_2, \dots, J_m) \geq J(J'_1, J'_2, \dots, J'_m) \iff (J_1, J_2, \dots, J_m) \geq (J'_1, J'_2, \dots, J'_m)$, где символ \geq означает «не менее предпочтителен, чем». Функцию $J(\cdot)$ назовем функцией эффективности при выборе альтернатив в автоматизированной ИИУС. Теория исследования операций объектов СТС предполагает ряд способов формирования единого критерия J_{ko} из набора частных критериев J_i с оценкой свойств этих способов. Приведем два наиболее характерных примера таких способов [7–9].

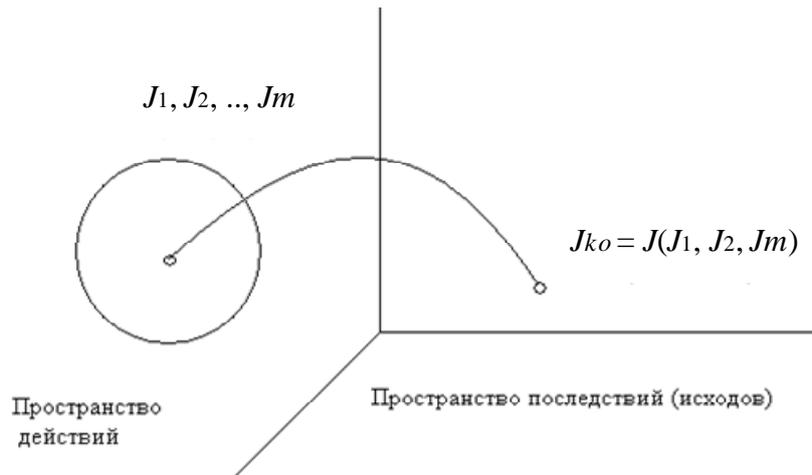


Рис. 1. Отображение действий в последствиях (исходы испытаний)

Способ 1. Критерий $J = J_{k0}$ также является взвешенной суммой частных критериев J_i [10]:

$$J_{k0} = \sum_{i=1}^m \lambda_i J_i. \quad (1)$$

Неравнозначность частных критериев для СТС J_i можно отразить выбором весовых коэффициентов λ_i , что позволяет с помощью этого критерия формулировать разные цели операции (существует методика экспертных оценок этих коэффициентов).

Общим свойством критерия (1) является то, что в оптимальных решениях возможно достижение высокого значения J_{k0} в ущерб какому-то частному критерию J_i . Поэтому критерий типа взвешенной суммы используется там, где в число ограничений включены ограничения на каждый из выходных параметров.

Способ 2. Критерий J_{k0} является минимальным из частных критериев СТС J_i [11]:

$$J_{k0} = \min_{1 \leq i \leq m} J_i. \quad (2)$$

Так следует поступать, когда J_i представляет собой некоторый запас в выполнении некоторых ограничений на некоторый параметр u_i , таким образом $J_i = u_i / (u_i^0) - 1$. При этом J_{k0} является минимальным из запасов, т.е. запасом в выполнении ИИУС всей совокупности ограничений на выходные параметры. Целью операции в автоматизированной ИИУС будет максимизация минимального запаса. Использование этого критерия оправдано в условиях неопределенности некоторых параметров, поскольку оптимальное решение в ИИУС лучше всего гарантирует выполнение заданных ограничений на выходные параметры при возможных колебаниях значений неопределенных параметров. Свойством этого критерия будет тенденция к равномерной степени достижения целей по каждому частному критерию. Тут невозможно улучшение результата операции в целом в ущерб какому-то одному критерию или, наоборот, за счет какого-то «рекордного» критерия. Чтобы придать данному способу необходимую гибкость в автоматизированной ИИУС, используем его модификацию в следующем виде [12]:

$$J_{k0} = \min_{1 \leq i \leq m} \lambda_i J_i. \quad (3)$$

Изменяя λ_i , можно получить математическую формулировку самых разнообразных целей и задач в автоматизированной ИИУС. Метод введения ограничений на выходные параметры в функцию эффективности (непосредственно в критерий) позволяет решать задачу оптимизации, в которой ограничения на выходные параметры можно не учитывать (они учитываются в ИИУС автоматически), что облегчает построение алгоритма оптимизации в ИИУС. Идея преобразования задачи оптимизации с ограничениями в задачу, оптимизации без ограничений путем изменения целевой функции (или критерия) является основой целой группы методов, называемых методами штрафных функций (или функции потерь).

Следует отметить, что приведенная концепция критериального замещения в автоматизированной ИИУС включает и методы математического конструирования, основанные на моделировании и показателях интеллектуальности «S_int» (например, градиентный и неградиентный поиск структур и параметров в СТС, методы экспертных оценок, а также эвристический «интуитивный» метод и т.д.), также она позволит проводить рациональные действия в альтернативах исследуемой (или вновь создаваемой) и применяемой системы СТС по основным показателям качества на протяжении всего жизненного цикла (рис. 2) [13–15].

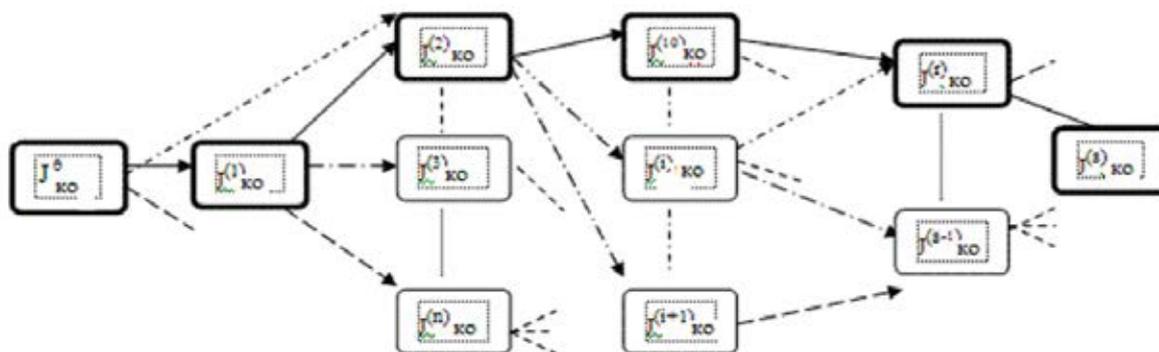


Рис. 2. Схематизация этапов критериального замещения в автоматизированной ИИУС

Таким образом, концепция разработки современных автоматизированных ИИУС для принятия управленческих решений ЛПР должна учитывать приведенные выше рассуждения в проектах создаваемых моделей и звеньев объектов СТС с учетом их замещения «по эффективности» на всех этапах их жизненного цикла. Предлагаемый подход возможен при построении и идентификации экспертных систем, а также в управлении проектами мониторинговых информационных систем.

Список литературы

1. Гладков, Д. И. Оптимизация систем неградиентным случайным поиском / Д. И. Гладков. – М. : Энергоатомиздат, 1984.
2. Казаков, И. Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / И. Е. Казаков. – М. : Наука, 1977.
3. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Советское радио, 1972.
4. Пугачев, В. С. Основы статистической теории автоматических систем / В. С. Пугачев, И. Е. Казаков, Л. Г. Евланов. – М. : Машиностроение, 1974.
5. Нейман, Дж. Два прорыва в теории выбора статистических решений / Дж. Нейман. – М. : Математика, 1964.
6. Растрингин, Л. А. Статистические методы поиска / Л. А. Растрингин. – М. : Наука, 1964.
7. Гайкович, А. И. Основы теории проектирования сложных технических систем / А. И. Гайкович. – СПб. : НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001. – 412 с.
8. Самков, Т. Д. Теория принятия решений / Т. Д. Самков. – Новосибирск : НГТУ, 2010. – 107 с.
9. Надежность и эффективность в технике : справ. Т. 3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – М. : Машиностроение, 1988. – 328 с.
10. Основы синтеза систем летательных аппаратов / А. А. Лебедев, Г. Г. Аджимамудов, В. Н. Баранов [и др.] ; под ред. А. А. Лебедева. – М. : Изд-во МАИ, 1996. – 224 с.
11. Райфа, Г. Анализ решений (введение в проблему выбора в условиях неопределенности) / Г. Райфа. – М. : Наука : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. – 408 с.
12. Андрейчиков, А. В. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 304 с.
13. Полтавский, А. В. Управление безопасностью движения беспилотного ЛА / А. В. Полтавский // Датчики и системы. – 2008. – № 9. – С. 4–8.
14. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
15. Полтавский, А. В. Комплексная методика оценки эффективности многоцелевых КБЛА / А. В. Полтавский, С. С. Семенов, А. А. Бурба // Боеприпасы. – 2010. – № 2. – С. 34–38.

Полтавский Александр Васильевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
Российской академии наук им. В. А. Трапезникова
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Жумабаева Асель Сагнаевна

старший преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский Национальный университет
им. Л. Н. Гумилева
(010000, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2)
E-mail: almatyaseri@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Показано, что принятие управленческих решений при разработке и оценках основных показателей качества и эффективности новых моделей и объектов СТС является сложным итеративным творческим процессом, в результате которого структуры ИИУС могут быть модифицированы на основе новых идей, альтернатив, т.е. на основе изменения логики проектирования. Концепция разработки современных автоматизированных ИИУС для принятия управленческих решений ЛПР должна учитывать приведенные выше рассуждения в проектах создаваемых моделей и звеньев объектов СТС с учетом их замещения «по эффективности» на всех этапах их жизненного цикла. Предлагаемый подход возможен при построении и идентификации экспертных систем, а также в управлении проектами мониторинговых информационных систем. Дается оценка современной тенденции излишнего доверия результатам математического моделирования в ущерб традиции оным конструкторским подходам. Предлагается подход к проектированию современных ИИУС на основе применения математических моделей для подготовке оптимального решения по критерию экстремума целевой функции с дальнейшей проверкой допустимости решений с использованием квантификации предпочтений. Приводится схематизация этапов критериального замещения в автоматизированной ИИУС. Предлагаемый подход возможен при построении и идентификации экспертных систем, а также в управлении проектами мониторинговых информационных систем.

Ключевые слова: сложная техническая система, информационно-измерительная система, критерии оптимизации, моделирование.

Poltavskiy Aleksandr Vasil'evich

doctor of technical sciences, leading researcher,
Institute of management problems
of Russian Academy of Sciences
named after V. A. Trapeznikov
(117997, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Zhumabaeva Asel' Sagnaevna

senior lecturer,
sub-department of space engineering and technology,
Eurasian National University
named after L. N. Gumilyov
(010000, 2 Satpaev street, Astana, Kazakhstan)

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. It is shown that the managerial decision-making in the development and assessment of the main indicators of the quality and efficiency of new models and objects STS is a complex iterative creative process, in which IIUS structure can be modified on the basis of new ideas, alternatives, ie, based on a change of logic design. the concept of the development of modern automated IIUS for management decision-making decision-makers should take into account the above considerations in projects created models and links ITS objects based on their substitution of "performance" at all stages of their life cycle. The proposed approach is possible in the construction and identification of expert systems as well as project management of monitoring information systems. The estimation of the current trend of over-reliance on the results of mathematical modeling to the detriment of the traditions of add-on design approach. An approach to the design of modern IIUS through the application of mathematical models for the preparation of the optimal solution on the criterion of the extremum of the objective function with a further validation check solutions using quantification preferences. We present schematization stages criterion substitution automated IIUS. The proposed approach is possible in the construction and identification of expert systems as well as project management of monitoring information systems.

Key words: a complex technical system, information-measuring system, optimization criteria, modeling.

УДК 519.85

Полтавский, А. В.

Информационная система: управление замещением критерия / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 20–25. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-3.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ И ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ТЕОРИИ ВЕКТОРНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ЗАДАЧ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

А. К. Гришко

Введение

Основной задачей теории векторного синтеза (ТВС) систем является выбор оптимальной структуры системы и ее параметров [1]. Но вопросы поиска оптимальных решений являются основным содержанием и целого ряда теорий, в том числе теории игр, теории статистических решений (ТСР) и теории исследования операций [2–5]. Поэтому для дальнейшего развития общей теории принятия решений, а также для углубленного развития каждой частной теории представляет большой интерес сравнительный анализ этих частных теорий и их взаимное обогащение.

В статье сравниваются основные положения ТВС и ТСР, поскольку обе эти теории имеют большое значение для весьма широкого спектра задач радиотехники и электроники.

Основные положения теории статистических решений

Важные положения ТСР удобно сформулировать следующим образом. Наблюдается совокупность $y = \{y_1, \dots, y_n\}$ случайных величин, имеющих известное условное распределение (плотность вероятности) $P(y|x)$, зависящее от неизвестного (случайного или детерминированного) параметра (или совокупности неизвестных параметров) x . Требуется на основе выборки y вынести решение Y о значении параметра x по некоторому правилу $\Delta(Y|x)$. Для оценки качества решения вводится неотрицательная функция потерь $I(x, Y)$, назначающая потери, соответствующие различным комбинациям значений x и Y [4, 6].

Качество решения характеризуется условным (при данном x) математическим ожиданием потери $I(x, Y)$, т.е. величиной R_x , называемой условным риском [7–9]:

$$R_x = \iint_{GY} I(x, Y) P(y|x) \Delta(Y|x) dY dy, \quad (1)$$

где G и Y – области возможных значений Y и y . Очевидно, условный риск является функцией как x , так и правила решения $\Delta(Y|x)$, поэтому удобно применять следующие обозначения:

$$R_x = R_x(\Delta) = f_{\Delta}(x). \quad (2)$$

Отсюда следует, что качество каждого правила решения характеризуется не числом, а некоторой функцией x . При этом разным правилам Δ в общем случае соответствует различный вид этой функции (рис. 1, 2).

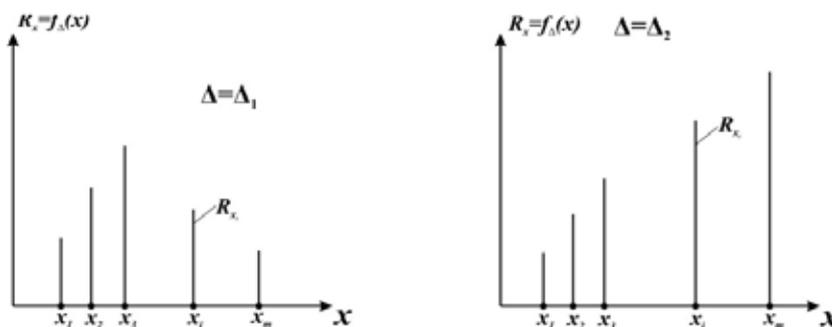


Рис. 1. Вид функции качества правила решения для дискретной величины

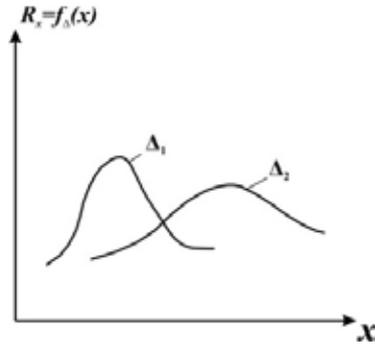


Рис. 2. Вид функции качества правила решения для непрерывной величины

Правило Δ_2 считается равномерно лучшим правила Δ_1 , если выполняется условие

$$R_x(\Delta_2) \leq R_x(\Delta_1). \quad (3)$$

Для всех $x \in X$, где X – область возможных значений параметра x , в том числе хотя бы для одного значения x , последнее неравенство (3) выполняется строго [10–12].

Правило решения Δ считается приемлемым, если среди множества M_d всех возможных (допустимых) правил не существует правила Δ^* , равномерно лучшего, чем Δ . В противном случае правило Δ считается неприемлемым. Класс (множество) правил решений, содержащий все приемлемые правила и, быть может, некоторые неприемлемые, называется полным классом [13, 14]. Если полный класс не содержит ни одного неприемлемого правила, то он называется минимальным полным классом [15, 16].

Используя для оценки качества правила решения функцию (2), возможно отсеять неприемлемые правила, но невозможно решить, какое из приемлемых правил является оптимальным (наилучшим). Поэтому для выбора оптимального правила решения необходимо применить какой-либо дополнительный критерий предпочтения. В ТСП в качестве такого критерия часто применяется минимаксный критерий [17, 18], т.е. наилучшим признается такое правило решения Δ_m , которое удовлетворяет условию

$$\begin{cases} \max_x R_x(\Delta_m) \leq \max_x R_x(\Delta), \\ \text{для всех } x \in X, \Delta \in M_d. \end{cases} \quad (4)$$

В тех случаях, когда известно априорное распределение $P(x)$ неизвестного параметра x , качество правила решения $\Delta(Y|x)$ может оцениваться средним риском

$$R = \int_X P(x) R_x(\Delta) dx. \quad (5)$$

Если x может принимать лишь дискретные значения x_1, \dots, x_m , то интеграл (5) превращается в сумму

$$R = \sum_{i=1}^m P(x_i) R_{x_i}(\Delta). \quad (6)$$

Оптимальным считается такое правило решения Δ^* , при котором средний риск R минимален. Это правило решения называется байесовым [17–19].

В ТСП доказывается, что при выполнении некоторых сравнительно слабых ограничений на функции $P(x)$, $P(y|x)$, $I(x, Y)$ справедливы следующие положения:

- 1) если байесово правило решения единственно, то оно приемлемое;
- 2) класс байесовых правил решения, соответствующих всем возможным видам распределения $P(x)$, является полным классом;

- 3) если минимальное правило решения единственно, то оно приемлемое;
 4) байесово правило решения Δ^* , при котором условный риск $R_x(\Delta^*)$ не зависит от x , является минимаксным правилом решения.

Если наложить на функцию распределения $P(x)$ дополнительное требование положительности (вместо очевидного требования отрицательности), то первых два положения принимают следующий вид:

- байесово правило решения – приемлемое;
- класс байесовых правил решения, соответствующих различным видам распределения $P(x)$, является минимальным полным классом.

Основные положения теории векторного синтеза

Качество синтезируемой системы S характеризуется совокупностью (вектором)

$$K = \{k_1, \dots, k_i, \dots, k_m\} \tag{7}$$

стандартных показателей качества $k_i = k_i(S)$, ($i = \overline{1, m}$). Вводится безусловный критерий предпочтения (БКП), в соответствии с которым система S'' считается лучшей, чем S' , если

$$K(S'') \leq K(S'), \tag{8}$$

т.е.

$$k_i(S'') \leq k_i(S') \tag{9}$$

для всех i , в том числе хотя бы для одного из значений номера i неравенство (9) выполняется строго.

Множество M_d всех возможных систем (вариантов построения системы), удовлетворяющих совокупности исходных условий и ограничений, называется множеством допустимых систем. Система $S \in M_d$ называется нехудшей, если в множестве M_d не существует безусловно лучшей системы. В противном случае система S называется худшей. В m -мерном пространстве показателей качества k_1, \dots, k_m множествам M_d , $M_{нх}$, M_x допустимых, нехудших и худших систем соответствуют множества допустимых, нехудших и худших точек.

БКП позволяет отсеять (исключить из дальнейшего рассмотрения) худшие системы (точки), но не позволяет выбрать одну из множества нехудших систем (точек). Поэтому для выбора оптимальной системы требуется в общем случае ввести какой-либо дополнительный – условный критерий предпочтения.

Если можно, исходя из назначения синтезируемой системы, ввести результирующий показатель качества k_p , являющийся известной функцией

$$k_p = f_p(k_1, \dots, k_m) \tag{10}$$

показателей качества k_1, \dots, k_m , такой, что чем меньше k_p , то тем лучше система, то оптимальной можно считать систему, у которой совокупность (вектор) $\{k_1, \dots, k_m\}$ показателей качества удовлетворяет условию

$$k_p = f_p(k_1, \dots, k_m) = \min. \tag{11}$$

Из определения показателей качества k_1, \dots, k_m и k_p следует, что зависимость функции k_p от каждого из ее аргументов при фиксированных (но произвольных в пределах области M_d) значениях остальных $(m-1)$ аргументов является монотонно возрастающей.

В частном случае зависимость (10) может быть линейной, при этом критерий (11) принимает вид

$$k_p = c_1 k_1' + \dots + c_i k_i' + \dots + c_m k_m' = \min_{S \in M_d}, \quad (12)$$

где

$$c_i > 0, i = \overline{1, m}, \sum_{i=1}^m c_i = 1; k_i' = k_1 / k_{i_M}, i = \overline{1, m}, \quad (13)$$

где $k_{i_M}, (i = \overline{1, m})$ – максимально допустимые (с точки зрения назначения системы) значения показателей $k_i, (i = \overline{1, m})$. Величины $1/k_1', \dots, 1/k_m'$ показывают, во сколько раз значения показателей качества k_1, \dots, k_m меньше их максимально допустимых значений, т.е. характеризуют «запасы» значений соответствующих показателей качества. Критерий (12) в дальнейшем называется **весовым**.

Однако во многих случаях вид функции (10) или значения весов в критерии (12) не могут быть достаточно обоснованы. В таких случаях одной из возможностей является применение минимаксного критерия, т.е. выбор в качестве оптимальной такой системы S_M , для которой выполняется неравенство

$$k_{\max}'(S_M) \leq k_{\max}'(S), \quad (14)$$

где для всех $S \in M_d$, где $k_{\max}' = \max_i(k_1', \dots, k_i', \dots, k_m')$ – наибольший из нормируемых показателей качества $k_1', \dots, k_i', \dots, k_m'$. Минимаксный критерий обеспечивает получение наименьшего значения наибольшего из нормированных показателей качества k_1', \dots, k_m' , т.е. наибольшего значения наименьшего из запасов в показателях качества.

С учетом основных свойств нехудших систем были доказаны следующие основные положения:

1. Система S , обращающая в минимум результирующий показатель качества k_p (в частности, система, минимизирующая сумму показателей качества k_1', \dots, k_m'), является нехудшей системой.
2. Если решение (система S), удовлетворяющее минимаксному критерию (14), является единственным, то оно нехудшее (система S – нехудшая система).
3. Если среди множества $M_{\text{нх}}$ нехудших систем, имеется система S , для которой выполняется условие

$$k_1' = k_i' = \dots = k_m', \quad (15)$$

т.е. имеет место равенство запасов, то эта система удовлетворяет минимаксному критерию (14) и, следовательно, является минимаксной системой S_M .

4. При выполнении некоторых условий множество решений, получаемых на основе весового критерия (12) при всех возможных комбинациях весов $c_i, (i = \overline{1, m})$, совпадает с множеством $M_{\text{нх}}$ всех нехудших систем, т.е. содержит все нехудшие и притом только нехудшие системы.

Сравнительный анализ положений ТСП и ТВС

В ТВС понятие «система S » играет такую же роль, как «правило решения $\Delta(Y|x)$ » в ТСП.

В ТСП качество правила решения характеризуется функцией качества – условным риском $R_x(\Delta) = f_\Delta(x)$.

В случае дискретного x эта функция качества вырождается в m -мерный вектор качества (см. рис. 1):

$$R_x = \{R_{x_1}, \dots, R_{x_i}, \dots, R_{x_m}\}. \quad (16)$$

В ТВС качество системы характеризуется m -мерным вектором качества:

$$K = \{k_1, \dots, k_i, \dots, k_m\}. \quad (17)$$

Следовательно, в случае дискретного x между ТСР и ТВС в этом смысле наблюдается полная эквивалентность.

Если x – непрерывная величина (см. рис. 2), то функцию качества $R_x(\Delta) = f_\Delta(x)$ можно приближенно аппроксимировать конечным числом m ее ординат R_{x_1}, \dots, R_{x_m} (рис. 3), т.е. заменить вектор качества (16), где $m \gg 1$.

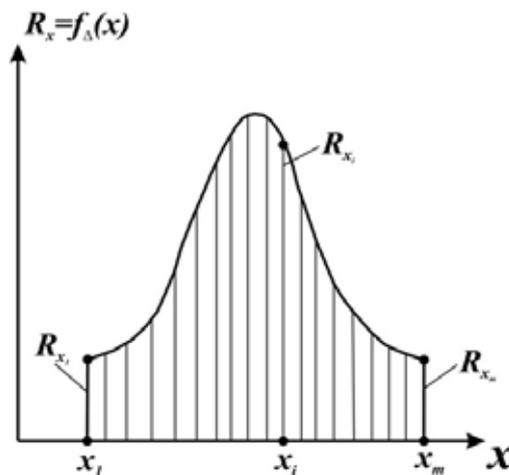


Рис. 3. Вид аппроксимированной функции качества правила решения

Следовательно, в случае непрерывного x между показателями качества, применяемыми в современных ТСР и ТВС, имеется лишь приближенная эквивалентность и при условии, когда в ТВС число показателей качества велико ($m \gg 1$). Эта эквивалентность стала бы полной, если бы в ТВС в некоторых случаях качество системы оценивалось непрерывной функцией качества. Практически такие случаи возможны, например, если требуется оценить качество радиоэлектронной системы, работающей в непрерывно меняющихся условиях: при изменениях температуры окружающей среды, ее влажности, внешних электромагнитных и механических воздействиях, других факторов.

Как мы видим, постановка задачи в ТСР и ТВС имеет много общего. Поэтому неудивительно, что при выполнении некоторых условий приведенные выше основные положения обеих теорий совпадают с точностью до терминологии. Для большей наглядности эквивалентные основные положения ТВС и ТСР приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что эквивалентность ТСР и ТВС для дискретного x остается приближенно справедливой и для непрерывного x , если в ТВС рассматриваются случаи, в которых $m \gg 1$.

В своем развитии ТСР, опираясь параллельно на методы теории вероятности, достигла несколько больших результатов, чем в ТВС. Поэтому, исходя из рассматриваемой аналогии между ними, можно прогнозировать большее количество дополнительных эквивалентностей. Это позволит существенно углубить и развить современную ТВС. С другой стороны, ТВС имеет больший ресурс для исследований и своего развития, и в какой-то момент результаты, полученные в ТВС, окажутся весьма полезными для ускорения развития ТСР.

Может показаться, что в дальнейшем вследствие значительной аналогии между задачами ТСР и ТВС обе эти теории могут полностью слиться в единую теорию решений. Такое развитие, в принципе, возможно, но вряд ли будет иметь место по следующим причинам.

Основные определения и положения ТВС и ТСП

Основные определения или положения ТСП	Основные определения или положения ТВС
Правило решения $\Delta(Y x)$	Система S
Вектор качества – условный риск $R_x = \{R_{x_1}, \dots, R_{x_i}, \dots, R_{x_m}\}$	Вектор качества – совокупность показателей качества $K = \{k_1, \dots, k_i, \dots, k_m\}$
Равномерно лучшее правило	Безусловно лучшая система
Приемлемое правило	Нехудшая система
Неприемлемое правило	Худшая система
Минимальный полный класс правил решений	Множество всех нехудших систем
Полный класс правил решений	Множество, содержащее все нехудшие решения
Критерий минимального среднего риска $R = \sum_{i=1}^m P(x_i)R_{x_i} = \min$ $P(x_i) > 0, i = \overline{1, m}$	Весовой (результатирующий) критерий $k_p = \sum_{i=1}^m c_i k_i = \min$ $c_i > 0, i = \overline{1, m}$ $\sum_{i=1}^m c_i = 1$
Минимаксное правило решения Δ_m удовлетворяет условию $\max_x R_x(\Delta_m) \leq \max_x R_x(\Delta)$ для всех $x \in X$, $\Delta \in M_d$, Δ – приемлемое правило принадлежит множеству всех возможных (допустимых) M_d	Минимаксная система S_m удовлетворяет условию $k'_{\max}(S_m) \leq k'_{\max}(S)$ для всех $S \in M_d$; $k'_{\max} = \max_i k'_i(S),$ k'_{\max} – наибольший из нормируемых показателей качества k'_i
Если для байесова (приемлемого) правила решения Δ^* условный риск $R_x(\Delta^*)$ не зависит от x , то правило Δ^* – минимаксное	Если для нехудшей системы $S_{\text{нх}}$ нормированный показатель качества $k'_i(S_{\text{нх}})$ не зависит от номера i (существует равенство запасов), то система S_m – минимаксная
Если $P_{x_i} > 0$, то байесово правило решения – приемлемое	Система, удовлетворяющая весовому критерию, – нехудшая
Если минимаксное правило решения Δ_m единственное, то оно приемлемое	Если минимаксная система S_m единственная, то она нехудшая
При некоторых условиях множество байесовых правил решения, соответствующих различным априорным распределениям, является минимальным полным классом	При некоторых условиях множество систем, удовлетворяющих весовому критерию при различных наборах весов $c_i > 0, i = \overline{1, m}$, является множеством нехудших систем

В ТСП рассматриваются существенно статистические задачи. В частности, в последние десятилетия ТСП развивалась применительно к синтезу радиоэлектронных систем по критериям помехоустойчивости и надежности действия. В отличие от этого для ТВС характерна оценка систем по совокупности целого ряда показателей качества, в том числе имеющих совершенно различную природу, например, по совокупности таких показателей, как вероятность отказа при действиях помех или по технологическим причинам, стоимость, вес, габариты, длительность процесса разработки и ввода в эксплуатацию и т.д. В этом смысле ТСП может рассматриваться как частный случай теории векторного синтеза, при котором учитываются лишь те показатели качества k_1, \dots, k_m , которые характеризуют надежность действия системы. Однако эта сравнительно невысокая возможность применимости ТСП для решения задач оптимизации позволяет сделать ее более глубокой, обосновать методику формирования целевых функций и целевых функционалов в сложных статистических условиях, в том числе в условиях неопределенности.

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день ТСР и ТВС не только имеют много общего, но и взаимно дополняют друг друга. Поэтому едва ли возможно создать единую теорию, которая была бы, с одной стороны, весьма общей и широкой, а с другой – достаточно глубокой. Вероятнее всего, что ТВС и ТСР будут существовать раздельно и в дальнейшем, взаимно обогащая друг друга, а конструкторы и проектировщики радиоэлектронных систем, в зависимости от особенностей оптимизации конструкторских задач, – делать выбор в пользу какой-либо из них или применять комплексную и комбинированную методики.

Статья подготовлена в рамках проектной части государственного задания выполнения государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок) № 8.389.2014/К по теме «Информационные технологии анализа конструкций радиоэлектронных средств при воздействии внешних факторов».

Список литературы

1. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985. – 509 с.
2. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Д. В. Артамонов, В. А. Канайкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 77–84.
3. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
4. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
5. Гришко, А. К. Динамическая оптимизация управления структурными элементами сложных систем / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Т. В. Жашкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 134–141.
6. Гришко, А. К. Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 51–57.
7. Гришко, А. К. Оптимальное управление частотным ресурсом радиотехнических систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 57. – С. 21–28. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
8. Гришко, А. К. Математическое моделирование системы обеспечения тепловых режимов конструктивно-функциональных модулей радиоэлектронных комплексов / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2015. – № 3. – С. 27–31.
9. Гришко, А. К. Анизотропная модель системы измерения и анализа температурных полей радиоэлектронных модулей / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 82–88.
10. Кочегаров, И. И. Выбор оптимального варианта построения электронных средств / И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев, А. К. Гришко // Вестник Пензенского государственного университета. – 2015. – № 2 (10). – С. 153–159.
11. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
12. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 85–90.
13. Гришко, А. К. Математическая модель системы анализа температурных полей радиоэлектронных модулей / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 2 (18). – С. 136–143.
14. Гришко, А. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 35, № 2-1. – С. 16.
15. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern

- Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016). – Lviv-Slavsko, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
16. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). – Moscow, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
17. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.
18. Andreyev, P. The Temperature Influence on the Propagation Characteristics of the Signals in the Printed Conductors / P. Andreyev, A. Grishko, N. Yurkov // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016). – Lviv-Slavsko, 2016. – P. 376–378. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452063.
19. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations / A. Grigor'ev, A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov, A. Micheev // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). – Moscow, 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Конструкции радиоэлектронных средств классифицируются как сложные системы, поскольку характеризуются многоуровневой иерархической структурой в виде отдельных узлов, блоков, модулей. Выбор оптимальной структуры радиоэлектронной системы с эффективными параметрами является для конструкторов важной задачей. Целью статьи является анализ применения различных методик и подходов, учитывающих особенности оптимизации конструкторских задач. **Методы.** В статье рассматриваются методы и положения теории векторного синтеза и теории статистических решений. **Результаты.** Сравнительный анализ методов и положений доказывает, что в теории статистических решений рассматриваются существенно статистические задачи. В отличие от этого для теории векторного синтеза характерна оценка систем по совокупности целого ряда показателей качества, в том числе имеющих совершенно различную природу. **Выводы.** Теория статистических решений и теория векторного синтеза не только имеют много общего, но и взаимно дополняют друг друга. Эти теории будут существовать раздельно и в дальнейшем, взаимно обогащая друг друга, а конструкторы и проектировщики радиоэлектронных систем, в зависимости от особенностей оптимизации конструкторских задач, – делать выбор в пользу какой-либо из них или применять комплексную и комбинированную методики.

Ключевые слова: теория векторного синтеза, теория статистических решений, оптимизация.

Grishko Aleksey Konstantinovich

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

Abstract. *Background.* Radio electronic systems are classified as complex systems, as they are characterized by multi-level hierarchical structure in the form of separate units, blocks and modules. The choice of the optimum radio electronic system with efficient parameters is an important engineering task. The aim of the article is to analyze the use of different methods and approaches that take into account the optimization of engineering tasks. *Methods.* The article discusses the methods and concepts of the theory of vector synthesis and the statistical decision theory. *Results.* The comparative analysis of the methods and concepts shows that the statistical decision theory operates mainly with statistical problems. In contrast, the theory of vector synthesis evaluates the systems considering the set of quality parameters, including those of completely different nature. *Conclusions.* Statistical decision theory and the theory of vector synthesis do not only have a lot in common but complement each other. These theories will continue to exist separately, supplementing each other. The radio electronic engineers, depending on the optimization needs for engineering problems, will either make a solution in favour of one of them, or use the complex and combined techniques.

Key words: theory of vector synthesis, statistical decision theory, optimization.

УДК 519.814: 512.642: 517.98

Гришко, А. К.

Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-4.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ С УПРУГИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

И. Е. Люминарский, Е. С. Люминарская

Введение

В настоящее время микропереключатели широко используются в автомобилях, авиации, космической технике и т.д. Важнейшим требованием, предъявляемым к разрывным электрическим контактам, является безотказность их работы. Отказы в электрических контактах микропереключателей могут происходить из-за тепловых, электрических, химических и механических явлений. Отказы в слаботочных контактах микропереключателей стержневого типа в основном появляются из-за поломки упругого элемента или распорной пружины, залипания подвижного контакта, дребезга контактов при коммутации, внезапного изменения силы прижатия контактов, загрязнения контактных поверхностей и др.

Важнейшим показателем работы микропереключателей является быстрдействие, которое определяется временем переключения и дребезгом контактов. Дребезг может вызывать сбои в работе электронной аппаратуры. Поэтому при проектировании микропереключателей необходимо не только определять время переключения, но и исследовать дребезг контактов. В микропереключателях быстрдействие обеспечивается рациональным подбором основных параметров.

Для создания надежных миниатюрных переключателей необходимо разрабатывать математические модели, учитывающие основные процессы, протекающие при коммутации, и использовать их для выявления причин и предвестников сбоев и отказов на этапе проектирования.

Постановка задачи

Существующие методики расчета колебаний контактных систем с упругими стержневыми элементами и упругими ограничениями основываются на использовании метода конечных элементов [1, 2]. В контактных системах упругие ограничители имеют высокую контактную жесткость. При ударе упругого элемента об ограничитель в нем возбуждаются формы колебаний высокой частоты, которые необходимо учитывать при исследовании дребезга контактов. Поэтому при расчете колебаний стержневого упругого элемента с жесткими ограничителями используют малый шаг интегрирования по времени и большое количество конечных элементов, что значительно увеличивает машинное время счета.

Целью данной работы является разработка методики динамического анализа микропереключателей с упругими стержневыми элементами, позволяющей исследовать их работу в момент переключения и дребезга контактов. Методика основана на применении метода Бубнова – Галеркина и использовании собственных форм упругого элемента с подвижным контактом в качестве базисных функций.

Математическая модель

В статье предлагается динамическая модель микропереключателя с упругим стержневым элементом, схема которого представлена на рис. 1. В этой модели принимаются следующие допущения: 1) корпус и толкатель являются абсолютно твердыми телами; 2) положение касания контакта бобышки с неподвижными контактами не изменяется; 3) деформации упругого элемента и распорной пружины подчиняются закону Гука; 4) инерция распорной пружины не учитывается; 5) инерция поверхностных слоев контактов не учитывается, а контактные деформации определяются по формулам Герца.

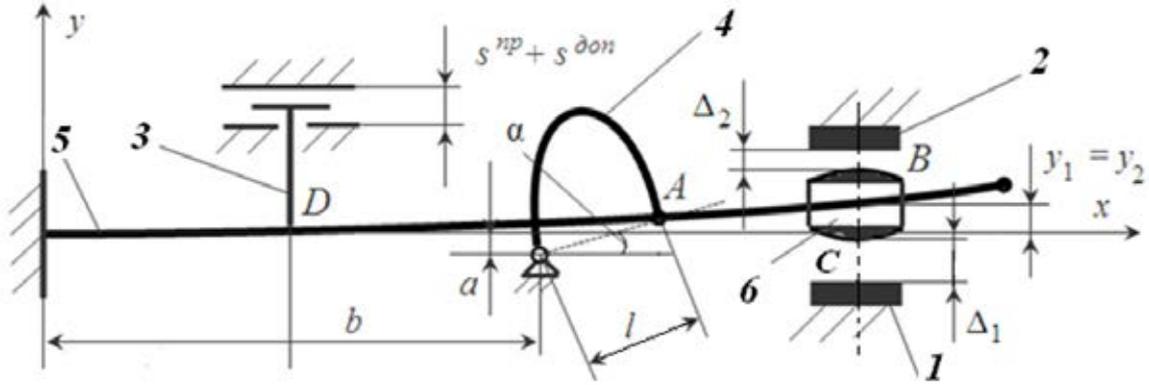


Рис. 1. Схема микропереключателя:
 1, 2 – неподвижные контакты; 3 – толкатель; 4 – распорная пружина;
 5 – упругий элемент; 6 – бобышка подвижного контакта

Быстродействие микропереключателей обеспечивается подбором таких параметров, при которых все положения равновесия упругого элемента с распорной пружиной без опоры на неподвижные контакты неустойчивы. Неустойчивость положений равновесия обеспечивается малыми углами наклона распорной пружины α (см. рис. 1). В этом случае даже при небольших перемещениях поперечных сечений вдоль оси y продольная составляющая силы со стороны распорной пружины \vec{S}_x будет оказывать значительное влияние на движение упругого элемента. Поэтому в предлагаемой математической модели микропереключателя учитывается влияние \vec{S}_x на деформацию упругого элемента.

Схема сил, действующих на упругий элемент, приведена на рис. 2. Продольная составляющая силы со стороны распорной пружины \vec{S}_x приближенно учитывается поперечной силой P^* и изгибающим моментом m^* . При таком учете продольной силы \vec{S}_x нелинейная зависимость внутреннего изгибающего момента от продольной координаты $\tilde{M}(x)$ заменяется линейной $M^*(x) = -P^* \cdot (x_4 - x) - m^*$ на участке $(0, x_4)$. Коэффициенты P^* и m^* определяются методом наименьших квадратов из условия

$$\Phi = \int_0^{x_4} (\tilde{M}(x) - M^*(x))^2 dx = \min, \quad (1)$$

где $\tilde{M}(x) = S_x(y - y_4)$, при $x \leq x_4$.

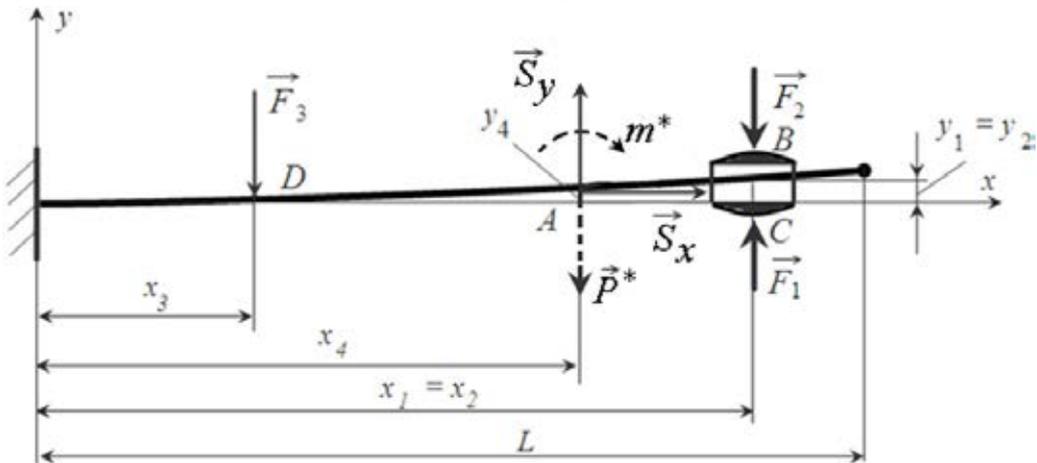


Рис. 2. Расчетная схема

После несложных преобразований получается формула для определения P^* и m^*

$$\begin{bmatrix} 0,5x_4^2 & x_4 \\ \frac{x_4^3}{3} & 0,5x_4^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^* \\ m^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \left(x_4 y_4 - \int y dx \right) \\ S_x \left(\frac{x_4^2 y_4}{2} - x_4 \int y dx + \int y \cdot x dx \right) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для динамического анализа микропереключателя используется дифференциальное уравнение движения балки при изгибе с учетом потерь на внутреннее трение [3]

$$m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EJ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(y + \beta \frac{\partial y}{\partial t} \right) \right] = q(x, t), \quad (3)$$

где $y(t, x)$ – функция перемещений поперечных сечений балки; m_0 – погонная масса балки; E – модуль упругости I рода; J – момент инерции поперечного сечения; β – линейризованный параметр диссипации; $q(x, t)$ – интенсивность силы, действующей на упругий элемент.

Интенсивность $q(x, t)$ может быть представлена следующим образом (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} q(x, t) = & S_y \cdot \delta(x - x_4) - P^* \cdot \delta(x - x_4) - m^* \cdot \delta'(x - x_4) + F_1(t) \cdot \delta(x - x_1) + \\ & + F_2(t) \cdot \delta(x - x_2) - F_3(t) \cdot \delta(x - x_3) - m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cdot \delta(x - x_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta(x - x_i)$ – дельта-функция Дирака; $m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cdot \delta(x - x_2)$ – сила инерции бобышки; m – масса бобышки.

Вертикальная составляющая силы от распорной пружины определяется из выражения

$$S_y = S \cdot \sin(\alpha) = \frac{k(l_0 - l)}{l} \cdot (y_4 + a) = r \cdot (y_4 + a), \quad (5)$$

где k – коэффициент жесткости распорной пружины; l_0 – длина недеформированной распорной пружины; l – длина деформированной распорной пружины.

Решение уравнения (4) можно приближенно представить в следующем виде [4, с. 170]:

$$y(t, x) = \sum_{j=1}^N C_j(t) \cdot U_j(x), \quad (6)$$

где $U_j(x)$ – нормированные по кинетической энергии собственные формы упругого элемента с бобышкой [3]; $C_j(t)$ – неизвестные функции; N – число учитываемых собственных форм.

Неизвестные функции $C_j(t)$ определяются из обыкновенных дифференциальных уравнений, которые получаются путем подстановки решения (6) в уравнение (4) и последующего скалярного умножения полученного уравнения на нормированные собственные формы $U_j(x)$ [3, 5]. Так как скалярное произведение двух различных собственных форм равно нулю, то все дифференциальные уравнения получаются независимыми. Для определения функции $C_j(t)$ необходимо решить одно дифференциальное уравнение второго порядка

$$\begin{aligned} \ddot{C}_i(t) + 2n \cdot \dot{C}_i(t) + \omega_i^2 \cdot C_i(t) = & r \cdot (y(t, x_4) + a) \cdot U_i(x_4) + \\ & + F_1(t)U_i(x_1) - F_2(t)U_i(x_2) - F_3(t)U_i(x_3) - P^* \cdot U_i(x_4) + m^* \cdot U_i'(x_4), \end{aligned} \quad (7)$$

где $i = 1, \dots, N$; ω_i – собственные частоты упругого элемента с бобышкой; $n = 0,5\beta\omega_i^2$ – коэффициент затухания; a – расстояние, показанное на рис. 1.

Собственные формы упругого элемента с бобышкой определялись методом последовательных приближений [4, с. 180; 6, с. 176–189].

Силы реакций F_1 и F_2 зависят от формы, шероховатости, запыленности и сближения контактных поверхностей. Значения этих сил определяются по методике, изложенной в работе [7].

Сила, действующая на упругий элемент со стороны толкателя, $F_3(t)$, вычисляется по формуле Герца.

Сближения контактных поверхностей зависят от перемещения точек упругого элемента y_k и начальных зазоров Δ_k^*

$$\Delta_1(t) = \Delta_1^* + y(t, x_1), \quad \Delta_2(t) = \Delta_2^* - y(t, x_2), \quad \Delta_3(t) = \Delta_3^* - y(t, x_3).$$

Для решения дифференциальных уравнений (7) участок интегрирования $(0, t_k)$ разбивается на M равных интервалов. На каждом интервале переменные величины $r, y(t, x_4), F_1, F_2, F_3, P^*, m^*$ считаются постоянными и принимаются равными средним значениям на шаге интегрирования.

В начальном положении толкатель расположен в крайнем верхнем положении и упирается в ограничитель, а упругий элемент и бобышка находятся в положении равновесия. Расчет выполняется при постоянной скорости толкателя, который движется из крайнего верхнего в крайнее нижнее положение.

В начальный момент времени производные $\frac{dC_i}{dt}$ равны нулю, а функции C_i определяются из уравнений (7), в которых все производные по времени приравниваются к нулю. Значения величин, входящих в правую часть дифференциальных уравнений (7), определяются из расчета равновесия упругого элемента.

Более подробно последовательность динамического анализа упругой системы, ограниченной упругими односторонними связями, изложена в [5].

Результаты исследования

Для проверки предложенной математической модели были проведены теоретические и экспериментальные исследования работы микропереключателя МП9, показанного на рис. 3.

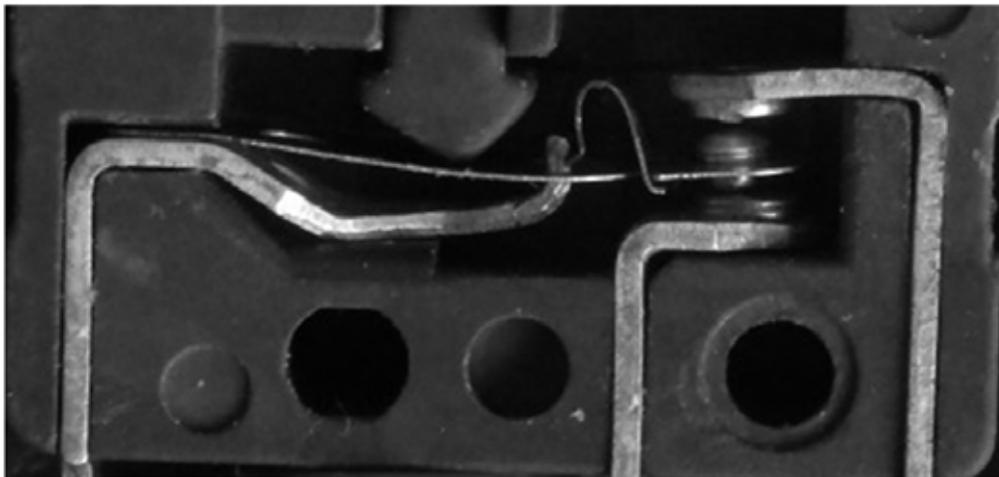


Рис. 3. Микропереключатель МП9

На рис. 4 показана зависимость силы прижатия контактов от времени в момент коммутации. Из графика видно, что при коммутации происходит дребезг контактов. В момент дребезга наблюдается четыре отрыва подвижного контакта от неподвижного контакта. Первый отрыв происходит в течение 0,12 мс, второй – 0,005 мс, третий – 0,041 мс, четвертый – 0,021 мс. Вычисления при различной жесткости распорной пружины показали, что при дребезге в основном происходит два-три отрыва со временем отрыва более $t_o > 0,02$ мс.

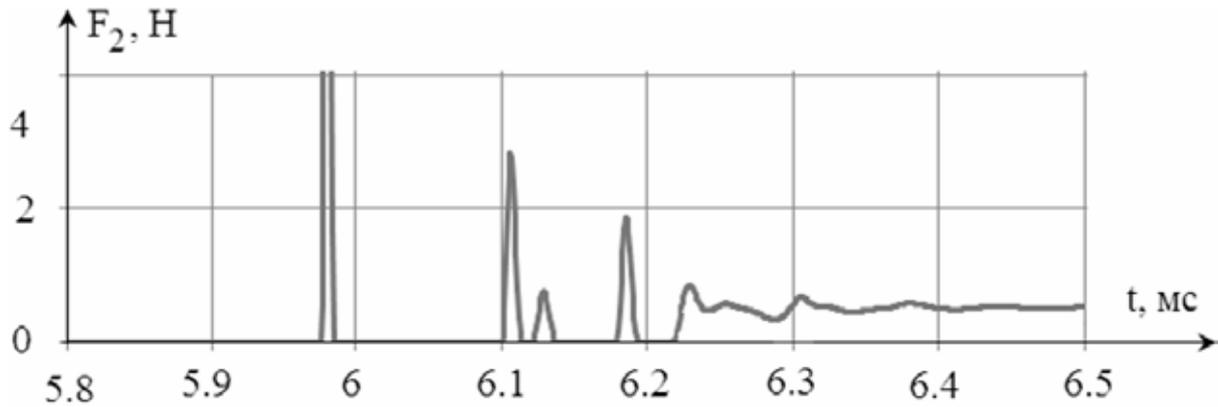
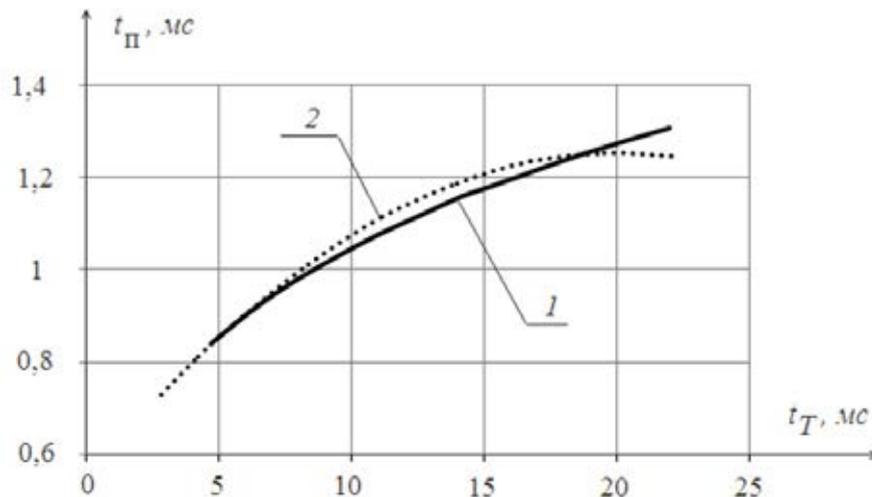


Рис. 4. Изменение силы прижатия контактов при коммутации

В исследуемом микропереключателе сила прижатия контактов \bar{F}_1 в положении равновесия (номинальная) составляет 0,64 Н. При первом взаимодействии максимальное значение этой силы превышает номинальное значение более чем в 10 раз, а время соприкосновения составляет менее 7 мкс (см. рис. 3). За такое короткое время в упругом элементе не успевают появиться большие деформации и напряжения [8, 9].

Расчетные исследования показали зависимость времени переключения от скорости движения толкателя. Поэтому для проверки адекватности математической модели была получена зависимость времени переключения от времени движения толкателя. Время движения толкателя определялось от начала движения толкателя до момента размыкания контактов 2 и б (см. рис. 1).

На рис. 5 приведены теоретическая и регрессионная зависимости времени переключения t_n от времени движения толкателя t_T . Время переключения t_n определяется от начала размыкания контактов 2 и б до момента первого касания контактов 1 и б (см. рис. 1). При определении экспериментальной зависимости использовалась квадратичная модель регрессии. В исследуемом диапазоне скоростей толкателя отклонение теоретических и экспериментальных значений времени переключения не превышает 5 %.


 Рис. 5. Зависимость времени переключения от времени движения толкателя:
 1 – теоретическая зависимость; 2 – регрессионная зависимость

Предложенная динамическая модель позволяет исследовать работу микропереключателя в период дребезга контактов. Для проверки адекватности модели в этот период работы исследовалась зависимость времени первого (наибольшего) отрыва при дребезге контактов 1 и б t_{o1} от времени переключения t_n . На рис. 6 показаны теоретическая и регрессионная зависимости. Для построения регрессионной зависимости также использовалась квадратичная модель регрессии.

Сравнение приведенных зависимостей показывает адекватность модели в фазе дребезга контактов. Расхождение теоретических и экспериментальных зависимостей не превышает 10 %.

Необходимо отметить, что при дребезге появляются два-три больших отрыва (с временем отрыва более 10 мкс). В экспериментальных исследованиях был получен большой разброс значений времени второго отрыва (15...60 мкс). Большой разброс значений может быть связан со случайными вибрациями корпуса, возникающими при коммутации.

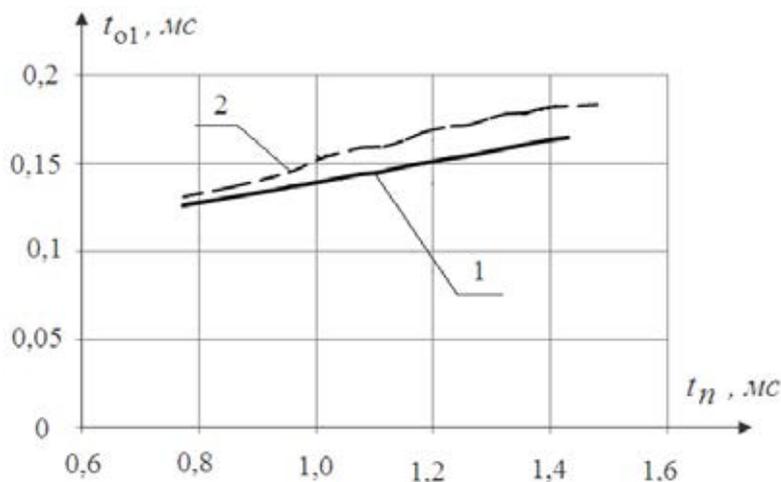


Рис. 6. Зависимость времени первого отрыва при дребезге контактов 1 и 6 от времени переключения: 1 – регрессионная зависимость; 2 – теоретическая зависимость

Выводы

1. Предложена математическая модель микропереключателей с упругими стержневыми элементами, позволяющая исследовать их работу в фазах переключения и дребезга контактов.
2. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной модели.
3. Установлено, что время переключения зависит от скорости движения толкателя.
4. Расчетным и экспериментальными путями доказано, что при дребезге контактов происходит три-четыре отрыва со временем отрыва от 10 до 140 мкс.

Список литературы

1. Контактные системы / В. В. Осташевичус, Б. В. Рудгальвис, В. Л. Рагульские, Б. П. Бакшис. – Л. : Машиностроение, 1987. – 279 с.
2. Уланов, А. В. Математические модели динамики, алгоритмы и информационно-измерительные средства виброакустической диагностики и неразрушающего контроля контактных устройств авиационных приборов : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.11.16 и 05.11.13 / Уланов А. В. – Ижевск : РГБ, 2006. – 178 с.
3. Вибрация в технике : справ. : в 6 т. – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова. – 456 с.
4. Вибрация в технике : справ. : в 6 т. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. – 352 с.
5. Люминарский, И. Е. Расчет упругих систем с односторонними связями : моногр. / И. Е. Люминарский. – М. : МГИУ, 2006. – С. 38–99.
6. Коллац, Л. Задачи на собственные значения / Л. Коллац. – М. : Наука : Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1968. – 504 с.
7. Люминарская, Е. С. Математическая модель слаботочных электрических контактов при сбое / Е. С. Люминарская, В. Н. Дианов // Динамика сложных систем – XXI век. – 2014. – Т. 8, № 1. – С. 73–78.
8. Интегродифференциальная кодоимпульсная модуляция в задачах повышения надежности в аппаратуре / В. Н. Дианов, Т. А. Гевондян, И. М. Белоусов, Е. С. Люминарская // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 136–137.
9. Дианов, В. Н. Диагностика интегродифференциальных сбоев в активных элементах интегральной схемотехники / В. Н. Дианов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 37–40.

Люминарский Игорь Евгеньевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теории механизмов и машин,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: lie260@mail.ru

Люминарская Екатерина Станиславовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электротехники
и промышленной электроники,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Микропереключатели с упругими стержневыми элементами широко используются в авиационной, космической, автомобильной и другой технике. Отказы в слабых контактах микропереключателей стержневого типа в основном появляются из-за поломки упругого элемента или распорной пружины, залипания подвижного контакта, дребезга контактов при коммутации, внезапного изменения силы прижатия контактов, загрязнения контактных поверхностей. В связи с этим появляется необходимость выявления предвестников отказов и сбоев на этапе проектирования и выбора основных параметров микропереключателей с учетом возможных загрязнений. Перспективным направлением в решении поставленной задачи является математическое моделирование, позволяющее исследовать работу микропереключателей при переключении и дребезге контактов в реальных условиях эксплуатации. *Материалы и методы.* Предложенная методика основана на применении метода Бубнова – Галеркина и использовании собственных форм упругого элемента с подвижным контактом в качестве базисных функций. *Результаты.* Разработанная динамическая модель микропереключателей позволила установить зависимость времени переключения от скорости движения толкателя и появление при дребезге контактов трех-четырех размыканий со временем отрыва подвижного контакта 10–140 мкс. Адекватность математической модели подтверждается экспериментальными данными. *Выводы.* Разработка динамических и математических моделей переключателей дает возможность учитывать основные процессы, протекающие в них при коммутации, и использовать их для выявления причин сбоев на этапе проектирования.

Ключевые слова: микропереключатель, дребезг, быстрдействие, стержневой упругий элемент, собственные формы.

Lyuminarskji Igor Evgenevich

doctor of technical science, professor,
sub-departmen of theory of mechanisms and machines,
Moscow State Technical University
named after N. E. Bauman
(105005, 2-nd Baumanskaya street, apartment 5,
building 1, Moscow, Russia)

Lyuminarskaja Ekaterina Stanislavovna

candidate of technical science, associate professor,
sub-departmen of electrical engineering
and industrial electronics,
Moscow State Technical University
named after N. E. Bauman
(105005, 2-nd Baumanskaya street, apartment 5,
building 1, Moscow, Russia)

Abstract. *Relevance and purpose.* Microswitches with elastic core elements are widely used in aerospace, automotive, etc. engineering. The bounce in low-voltage contacts of the microswitch rod type mostly appear because of a breakage of the elastic element or spacer springs, sticking the movable contact to contact bounce when switching, sudden change of the pressing force of the contact, contamination of contact surfaces. In this regard, there is the need to identify precursors of failures and failures at the design stage and selection of basic parameters of switches with consideration of possible contamination. A promising direction in solving this problem is mathematical modeling, which allows to investigate the operation of the switches when switching and contact bounce in real conditions. *Materials and methods.* The proposed method based on the method of Bubnov-Galerkin and use their own forms of the elastic element with a movable contact as basis functions. Results. Developed the dynamic model of the micro switches has allowed to establish the dependence of the switching time of the speed of movement of a pusher and a contact bounce three or four razmiene with the time separation of the movable contact 10-140 ISS. The adequacy of the mathematical model is confirmed by experimental data. *Conclusions.* Development of dynamic and mathematical models of switches takes into account basic processes proceeding in them at switching, and use them to identify the causes of failures at the design stage.

Key words: microswitch, bounce, speed, the rod elastic element, their own forms.

УДК 621.3.06 + 621.01

Люминарский, И. Е.

Динамическая модель микропереключателей с упругими стержневыми элементами / И. Е. Люминарский, Е. С. Люминарская // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 35–42. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-5.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621.396.98.004.1

DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-6

К ВОПРОСУ О ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Д. А. Затушный

Перспектива перехода к новому методу наблюдения в гражданской авиации – режиму автоматического зависимого наблюдения – вызвана тенденцией к повышению интенсивности воздушного движения в мире вообще и в Российской Федерации в частности. Таким образом, повышаются требования к точности и достоверности информации, передаваемой с борта воздушного судна. Полные преимущества АЗН могут быть реализованы при использовании дополнительной двусторонней линии передачи данных и/или речевой связи между экипажем и диспетчером (речевая связь предусматривается, по крайней мере, в аварийных и нестандартных ситуациях).

Требования к характеристикам приложений линии передачи данных представлены в табл. 1.

Таблица 1

Требования к характеристикам приложений линии передачи данных

Приложение	Готовность (%)	Целостность	Надежность (%)	Непрерывность (%)
DLIS	99,9	10^{-6}	99,9	99,9
ADS	99,996	10^{-7}	99,996	99,996
CPDLC	99,99	10^{-7}	99,99	99,99
FIS	99,9	10^{-6}	99,9	99,9
AIDS	99,996	10^{-7}	99,9	99,9

FIS (Flight Information Service – Полетно-информационное обслуживание) обеспечивает повышение уровня безопасности полета и улучшение информированности пилота об обстановке. В настоящее время полетно-информационное обслуживание ВС осуществляется в основном через каналы речевой связи. Приложение линии передачи данных FIS (DFIS) позволяет пилоту запрашивать и получать услуги FIS от наземных систем через линию передачи данных.

Приложение DLIS реализует механизм обмена информацией, необходимой для установления линии передачи данных между бортовой системой и наземной системой УВД. Данное приложение инициируется бортовой системой.

Приложение AIDS предусматривает обмен данными между органами ОВД с целью поддержки критических функций по УВД, включая уведомление о полетах, приближающихся к границе района полетной информации, координацию условий пересечения границы и передачу управления.

Приложение Controller Pilot Data Link Communications – информационная линия передачи рутинных сообщений (CPDLC), представляющая собой средство связи между диспетчером и пилотом. Применение CPDLC позволит устранить ряд ограничений речевой связи, таких как перегруженность речевого канала, неправильное понимание и/или неправильная интерпретация информации.

В качестве линии передачи данных рассматривается система, состоящая из приемной, передающей аппаратуры и среды распространения сигнала. В процессе передачи данных возможны погрешности, связанные:

- 1) с работой передающей аппаратуры;
- 2) работой приемной аппаратуры;
- 3) средой распространения сигнала.

Для устранения этих трех видов ошибок используют:

1) резервное оборудование. В случае, если устройство, передающее сигнал, перестает отвечать требуемым характеристикам, происходит переключение на другой приемник;

2) коды, обнаруживающие ошибки и коды, исправляющие ошибки. Для использования кодов, исправляющих ошибки, необходимо задействовать достаточно сложные устройства, требующие больших экономических затрат. Поэтому чаще находят применение коды, обнаруживающие ошибки. К недостаткам систем, использующих подобные коды, относится то, что в процессе передачи информации возможно обнаружить только одну-две ошибки. Помимо этого, следует отметить, что повторная передача информации требует дополнительных временных затрат, что не всегда приемлемо, так как навигационные данные за это время могут измениться. Также в этом случае не получается квитирование, т.е. подтверждение о правильной передаче информации. Дополнительной проблемой, возникающей при передаче данных, является синхронизация начала и конца передачи. Для этого используют:

- 1) синхронизацию по отдельному каналу;
- 2) синхронизацию самого сигнала.

Недостатком первого метода является то, что в этом случае задействуется дополнительный частотный ресурс. Недостатком второго метода является то, что в этом случае задействуется дополнительный временной ресурс. Также необходимо время на то, чтобы войти в канал связи по синхронизации.

Таким образом, возникает оптимизационная задача: выбрать систему, которая максимально правильно передает навигационную информацию в заданное время и удовлетворяет требованиям экономичности.

Отказ линии передачи данных в ОВЧ-диапазоне определим как событие, заключающееся в невыполнении совокупности неравенств:

$$\Delta x_{\text{АЗН}} \leq \Delta x_{\text{доп}}, \quad (1)$$

$$t_{\text{пер}} \leq t_{\text{доп}},$$

где $\Delta x_{\text{АЗН}}$ – ошибка при передаче данных в режиме АЗН; $\Delta x_{\text{доп}}$ – максимально допустимая ошибка при передаче данных; $t_{\text{пер}}$ – время передачи данных; $t_{\text{доп}}$ – допустимое время передачи данных.

Поскольку линия передачи данных представляет собой сложную многофункциональную систему со структурной и функциональной избыточностью, то появление отказов в каких-либо элементах системы не обязательно приводит к отказу всей системы в целом. При наличии отказов функциональная задача выполняется, но с пониженным качеством.

В процессе эксплуатации линия передачи данных подвержена воздействию различных дестабилизирующих факторов и помех. Это приводит к отклонениям параметров от номинальных значений и возникновению отказов. Для конкретного полета отклонения параметров от номинальных значений будем считать случайными величинами, а возникающие отказы – внезапными.

Для оценки вероятности достоверной передачи информации необходимо иметь статистику по использованию составляющих линии передачи данных. Такая информация может быть получена из экспериментальных данных при проектировании приемной и передающей аппаратуры, а также при использовании этих элементов линии передачи данных на различных воздушных судах. Следует отметить, что для точной оценки этого показателя проблематично использовать статистические данные по отказам исследуемой линии передачи данных, полученных во время ее испытаний, так как объем этой статистики ограничен временным ресурсом, отведенным на испытания.

Следует заметить, что под отказом понимается ошибка при передаче или приеме информации вследствие воздействия внешних источников помех на передатчик или приемник.

Для оценки вероятности достоверной передачи информации такой системой сформулируем задачу. Пусть у нас имеется система связи, состоящая из приемной аппаратуры, передающей ап-

паратуры и среды распространения сигнала. Введем величину p_i , характеризующую параметр надежности i -го типа элемента (вероятность того, что не произойдет отказ в течение полета ВС), $i = 1, \dots, 3$. Среду распространения сигнала будем условно считать «элементом» системы, по которому собрана статистика, например, по передаче данных с борта ВС в горных или городских районах. Вероятность безотказной работы всей системы связи характеризуется функцией $R(p)$ – вероятности того, что вся система не откажет в течение полета ВС. Требуется с заданной вероятностью оценки γ оценить $R(p)$, т.е. найти величину \underline{R} , такую, что $\underline{R} = \min R(p)$ при всех значениях параметров надежности элементов, составляющих линию передачи данных.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Н. К. Юрков, П. Г. Андреев, А. С. Жумабаева // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 201–203.
2. Исследование программных пакетов моделирования влияния электромагнитных воздействий на изделия радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 206–209.
3. Акиншин, Р. Н. Методика оценки эффективности автоматизированных радиолокационных систем контроля в зоне ответственности / Р. Н. Акиншин, В. А. Ушаков, Д. В. Морозов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2011. – № 168 (6). – С. 66–76.
4. Затучный, Д. А. Оценка вероятности безотказной работы при передаче информации / Д. А. Затучный // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 198. – С. 88–90.

Затучный Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра вычислительных машин, комплексов,
систем и сетей,
Московский государственный технический
университет гражданской авиации
(125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
E-mail: zatuch@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются проблемы достоверной передачи информации при переходе к перспективному режиму наблюдения за воздушным судном – автоматическому зависимому наблюдению. Приведены характеристики и описание приложений линии передачи данных – основы для функционирования режима автоматического зависимого наблюдения. Подробно проанализированы различные погрешности, которые могут возникнуть при передаче информации по линии передачи данных и приведены возможности их устранения. Определено понятие отказа линии передачи данных не только в физическом смысле, но и в виде совокупности неравенств. Сформулирована задача по оценке вероятности достоверной передачи информации такой системой.

Ключевые слова: автоматическое зависимое наблюдение, достоверность передачи информации, погрешность передачи информации, отказ линии передачи данных.

Zatuchnyy Dmitriy Aleksandrovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of calculable machines, complexes,
systems and networks,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(125993, 20 Kronshtadtskiy boulevard,
Moscow, Russia)

Abstract. The problems of reliable information transfer are examined this article in transition to the perspective mode of watching an air ship – to the automatic dependent supervision. Descriptions over and description of appendixes of DTL are brought are bases for functioning of the mode of automatic dependent supervision. Different errors that can arise up at an information transfer on DTL and possibilities over of their removal are brought are analysed in detail. The concept of refuse of DTL is certain not only in physical sense but also as totality of inequalities. A task is set forth as evaluated by probability of reliable information transfer by such system.

Key words: automatic dependent supervision, authenticity of information transfer, error of information transfer, refuse of data's broadcasting line.

УДК 621.396.98.004.1

Затучный, Д. А.

К вопросу о достоверности передаваемой информации в режиме автоматического зависимого наблюдения / Д. А. Затучный // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 43–45. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-6.

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ
НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПЕРЕДАВАЕМОЙ
С БОРТА ВОЗДУШНОГО СУДНА В РЕЖИМЕ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ**

Д. А. Загучный

Навигационная информация в режиме автоматического зависимого наблюдения передается по линии передачи данных с борта воздушного судна. Соответственно, возникает проблема оценки достоверности передачи информации такой системой [1].

Предположим, что на основе одного и того же набора элементов, составляющих линию передачи данных с параметрами надежности $p = (p_1, p_2, p_3)$, построены две различные системы с функциями надежности $R(p)$ и $R'(p)$, которые будем называть соответственно основной и опорной.

В качестве опорной сети будем использовать последовательную в смысле надежности систему, т.е. систему, состоящую из элементов, соединенных последовательно, без наличия любого вида резерва (нагруженного или ненагруженного) по любому из этих элементов. Функция надежности такой системы имеет вид

$$R'(p) = \prod_{i=1}^3 p_i^{l_i}, \quad (1)$$

где l_i – это количество элементов i -го типа в системе.

Предположим, что имеется следующая информация о линии передачи данных, используемой во время полета ВС [2]:

1) каждый i -й элемент, входящий в систему, использовался N_i раз или имеется информация по его использованию на других ВС;

2) d_i раз из этого числа происходил отказ. В качестве оценки с вероятностью γ для надежности всей сети берется оценка надежности для одного отдельно взятого типа элемента с минимальным объемом использования во время полета ВС в предположении, что для него получено так называемое «приведенное» число отказов, вычисляемое по формуле

$$D_i = N_i(1 - P), \quad i = 1, \dots, 3, \quad (2)$$

где P – это точечная оценка надежности опорной сети, вычисляемая по формуле

$$P = \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{d_i}{N_i} \right). \quad (3)$$

Нахождение оценки надежности основной системы сводится к задаче нахождения минимума $\underline{R} = \min R(p)$ при ограничениях

$$\prod_{i=1}^3 p_i^{l_i} \geq \underline{R}. \quad (4)$$

Как показывают экспериментальные данные [3], переменную p_i следует представить в виде $p_i = e^{-z_i}$. Далее задача заключается в нахождении максимума функции $f(z)$ при ограничении

$$l_1 z_1 + l_2 z_2 + l_3 z_3 \leq -\ln \underline{R}. \quad (5)$$

Максимум достигается в одной из точек вида

$$z^{(i)} = \{(0, z_i, 0), (z_i, 0, 0), (0, 0, z_i)\},$$

где

$$z_i = -\left(\frac{1}{l_i}\right) \ln R'. \quad (6)$$

В этом легче всего убедиться из геометрических соображений, решая задачу нахождения максимума выпуклой функции на выпуклом множестве.

В случае данной задачи в качестве основной рассматривается сеть связи, представляющая из себя последовательно-параллельную систему. При этом один из ее «элементов» (среда распространения сигнала) не имеет резерва. В этом случае оценка надежности находится по формуле

$$\underline{R} = 1 - \left(1 - \left(\underline{R}'\right)^{\frac{1}{l_i}}\right)^{n_i}. \quad (7)$$

Это следует из того, что функция надежности любой последовательно-параллельной структуры вычисляется по формуле

$$R(p) = \prod_{i=1}^m (1 - q_i^{n_i}). \quad (8)$$

Произведем улучшение метода вспомогательной структуры для получения максимальной оценки надежности линии передачи данных путем введения не одной, а нескольких вспомогательных сетей. В дальнейшем этот метод будет называться МВС II. Для этого необходимо рассмотреть все возможные виды областей, основанных на соотношениях $>$ и $<$ между величинами z_i .

Таких областей для системы, состоящей из трех элементов, насчитывается $3! = 6$. Критических точек в общем случае по всем таким областям будет $2^3 = 8$.

На каждой из таких областей мы подбираем для нашей основной системы свою вспомогательную сеть, по каждой из них находим минимум способом, описанным выше, и далее из этих минимумов находим минимальное значение, которое и будет являться оценкой надежности линии передачи данных с борта ВС.

Рассмотрим пример. Пусть на борту ВС используется линия передачи данных, данные об объеме использования по каждому типу элемента и количестве элементов по каждому типу мы занесем в табл. 1.

Таблица 1

Информационные данные о линии передачи данных

i	1	2	3
N_i	N_1	N_2	N_3
d_i	d_1	d_2	d_3
n_i	n_1	n_2	n_3

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

N_i – объем использования каждого типа элемента; d_i – количество отказов по каждому типу элемента; n_i – количество элементов i -го типа.

Функция надежности такой системы имеет вид

$$R(p) = \prod_{i=1}^3 (1 - (1 - p_i)^{n_i}). \quad (9)$$

Будем находить минимум этой функции по области, заданной ограничениями

$$\sum_{i=1}^3 l_i z_i \leq -\ln R',$$

$$z_1 \leq z_2 \leq z_3.$$
(10)

Область $z_1 \leq z_2 \leq z_3$ обозначим как G_m .

Оценка вероятности безотказной работы такой системы при заданной дополнительной информации такого рода будет находиться как минимальная из величин [4]:

$$\left[1 - \left(1 - \left(R' \right)^{\frac{1}{l_3}} \right) \right], \left[\left(1 - \left(1 - \left(R' \right)^{\frac{1}{l_2+l_3}} \right)^{n_2} \right) * \left(1 - \left(1 - \left(R' \right)^{\frac{1}{l_2+l_3}} \right)^{n_3} \right) \right],$$

$$\left[\left(1 - \left(1 - \left(R' \right)^{\frac{1}{l_1+l_2+l_3}} \right)^{n_1} \right) * \left(1 - \left(1 - \left(R' \right)^{\frac{1}{l_1+l_2+l_3}} \right)^{n_2} \right) * \dots * \left(1 - \left(1 - \left(R' \right)^{\frac{1}{l_1+l_2+l_3}} \right)^{n_3} \right) \right].$$
(11)

Очевидно, что оценка вероятности безотказной работы системы, полученная методом вспомогательной структуры, улучшается по мере увеличения разбиения области и использования вспомогательной структуры по каждому элементу разбиения. Этот факт следует из того, что точки $z^{(i)}$, по которым ищется оценка вероятности безотказной работы в случае меньшего разбиения области, входят как составная часть в состав точек для большего разбиения, т.е.

$$G_m \in G_{m+1}$$
(12)

и, следовательно,

$$\underline{R}_{MBC(m)} \leq \underline{R}_{MBC(m+1)}.$$
(13)

Преимущества, которые дают методы вспомогательной структуры по сравнению с методами плоскости и прямоугольника, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение методов вспомогательной структуры с методами плоскости и прямоугольника
 $N_1 = 50 \ N_2 = 20 \ N_3 = 10 \ n_1 = 2 \ n_2 = 1 \ n_3 = 3$

Количество отказов по каждому типу канала связи	МВС II	МВС I	Метод прямоугольника	Метод плоскости
$d1 = 0 \ d2 = 0 \ d3 = 0$	0,9550	0,9550	0,8911	0,9550
$d1 = 0 \ d2 = 0 \ d3 = 1$	0,9375	0,9314	0,8437	0,9242
$d1 = 0 \ d2 = 0 \ d3 = 2$	0,8832	0,8706	0,7733	0,8970
$d1 = 0 \ d2 = 1 \ d3 = 0$	0,9242	0,9242	0,8580	0,9242
$d1 = 0 \ d2 = 2 \ d3 = 0$	0,8970	0,8900	0,8294	0,8970
$d1 = 1 \ d2 = 0 \ d3 = 0$	0,9403	0,9245	0,8630	0,9242
$d1 = 2 \ d2 = 0 \ d3 = 0$	0,9144	0,9042	0,8301	0,8970
$d1 = 1 \ d2 = 1 \ d3 = 1$	0,8898	0,8612	0,7868	0,8320
$d1 = 2 \ d2 = 8 \ d3 = 1$	0,6599	0,5492	0,6038	0,5004

Из сравнения 2-го и 3-го столбца табл. 2 можно сделать следующие выводы:

1) оценка вероятности передачи достоверной информации линией передачи данных, полученная методом, основанным на введении опорных систем, тем выше, чем больше мы используем опорных систем, т.е. чем сильнее разбиение области, по которой ищется максимум;

2) в случае отсутствия отказов по каждому элементу (эта информация может быть получена из информации о полетах других ВС или в случае использования систем, структура которых в чем-то аналогична исходной) оценка вероятности передачи достоверной информации линией пе-

редачи данных, полученная методом вспомогательной структуры, не улучшается с увеличением числа опорных систем.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Н. К. Юрков, П. Г. Андреев, А. С. Жумабаева // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т.1. – С. 201–203.
2. Исследование программных пакетов моделирования влияния электромагнитных воздействий на изделия радиоэлектронных средств / С. А. Бростилов, Т. Ю. Бростилова, Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, А. О. Бекбаулиев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 206–209.
3. Акиншин, Р. Н. Методика оценки эффективности автоматизированных радиолокационных систем контроля в зоне ответственности / Р. Н. Акиншин, В. А. Ушаков, Д. В. Морозов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2011. – № 168 (6). – С. 66–76.
4. Затучный, Д. А. Оценка вероятности безотказной работы при передаче информации / Д. А. Затучный // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 198. – С. 88–90.

Затучный Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра вычислительных машин, комплексов,
систем и сетей,
Московский государственный технический
университет гражданской авиации
(125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
E-mail: zatuch@mail.ru

Zatuchnyy Dmitriy Aleksandrovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of calculable machines, complexes,
systems and networks,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(125993, 20 Kronshtadtskiy boulevard,
Moscow, Russia)

Аннотация. *Актуальность и цели.* Автоматическое зависимое наблюдение (АЗН) является перспективным режимом в управлении воздушным движением. Суть АЗН заключается в том, что навигационная информация, полученная от спутниковых радионавигационных систем (СРНС) на борту воздушного судна, передается по линии передачи данных с борта воздушного судна в наземные службы УВД в цифровой форме. Таким образом, безотказная работа линии передачи данных является необходимым условием для функционирования АЗН и обеспечения безопасности полетов за счет качественного обмена информацией. Соответственно, возникает проблема оценки достоверности передачи информации такой системой. *Материалы и методы.* Перспективным методом для решения этой задачи является использование статистической информации по эксплуатации систем, состав которых аналогичен исходной. В качестве вспомогательной системы предлагается использовать систему, состоящую из элементов, соединенных последовательно, без наличия любого вида резерва (нагруженного или ненагруженного) по любому из этих элементов. Основным используемым математическим методом является метод линейного программирования, т.е. для данного случая нахождение минимума функции надежности линии передачи данных с борта воздушного судна, представляющей собой последовательно-параллельную структуру с ограничением параметров на вспомогательную систему. *Результаты.* Получена формула оценки достовер-

Abstract. *Background.* An automatic dependent supervision (ADS) is the perspective mode in air traffic control. Essence of ADS consists in that the navigation information got from the satellite radionavigation systems (SRNS) aboard an air ship is passed on DTL from an aircraft side in the surface servings as ATM in a digital form. Thus, faultless work of DTL is a necessary condition for functioning of ADS and providing of safety of flights due to a quality exchange information. Accordingly, there is a problem of estimation of authenticity of information transfer such system. *Materials and methods.* A perspective method for the decision of this task is the use of statistical information on exploitation of the systems composition of that is analogical to initial. As an auxiliary system it is suggested to use the system, consisting of the elements united consistently, without the presence of any type of reserve (loaded or unloaded) on any of these elements. The basic used mathematical method is a method of the linear programming, id est for this case being of a minimum of function of reliability of DTL from an aircraft side, being a consistently-parallel structure with the limit of parameters on auxiliary. *Results.* The formula of estimation of authenticity of information transfer is got on DTL. Modernisation of the offered method is produced due to the use not alone, and a few ancillariess. Results over of comparison of method are brought with the known methods of estimation of reliability of the systems – methods of plane and rectangle. Drawn conclusion, in what cases the offered method gives more exact estimation. *Conclusions.* An estimation of probability of reliable information transfer

ности передачи информации по линии передачи данных. Произведена модернизация предложенного метода за счет использования не одной, а нескольких вспомогательных систем. Приведены результаты сравнения метода с известными методами оценки надежности систем – методами плоскости и прямоугольника. Сделан вывод, в каких случаях предложенный метод дает более точную оценку. *Выводы.* Оценка вероятности передачи достоверной информации по линии передачи данных предложенным методом является более точной, чем у известных методов решения данной задачи. Оценка вероятности передачи достоверной информации линией передачи данных, полученная методом, основанным на введении опорных систем, тем выше, чем больше мы используем опорных систем.

Ключевые слова: автоматическое зависимое наблюдение, основная и опорная система, максимум функции, отказ системы.

on DTL by the offered method is more exact, than at the known methods of decision of this task. Estimation of probability of reliable information transfer DTL, got the method, based on introduction of the supporting systems the higher, than anymore we use supporting systems.

Key words: automatic dependent supervision, main and basic system, function maximum, system failure.

УДК 621.396.98.004.1

Затучный, Д. А.

Статистическая оценка достоверности навигационной информации, передаваемой с борта воздушного судна в режиме автоматического зависимого наблюдения / Д. А. Затучный // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 46–50. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-7.

TENDENCIES IN CREATING MODERN RADIO ABSORBING MATERIALS AND COATINGS

S. B. Menshova

Designation of radio absorbing materials (RAM) and coatings (RAC)

According to the Act of the Russian Federation "About the state regulation in the field of ensuring electromagnetic compatibility of technical means" [1], requirements for the level of electromagnetic radiation of available electronic and electrical appliances become tougher. The Act is directed to the coordinated operation of devices and appliances, as well as to the protection of people against electromagnetic radiation. It is known that the electromagnetic radiation of the technogenic type damages the coordinated operation of all the systems in a human body [2]. Tests for compliance with the requirements are carried out in the anechoic chambers whose walls are coated with RAM and RAC necessary for the protection of the personnel and measuring devices against the re-reflected electromagnetic radiation (EMR). The anechoic chambers are also used for testing and tuning of sensitive and high-precision systems which include satellite systems, georadars, marine radio buoys etc.[3].

Many countries apply shielding for the purpose of health protection of people and protection of sensitive devices against electromagnetic radiation (EMR). The shielded buildings are also necessary for protection against unauthorized picking-up of information from processing devices, data transmission devices and data storage units.

Electromagnetic shielding

When choosing shielding materials, it is generally assumed that at frequencies up to 1 MHz a dominating factor is magnetic permeability, and at frequencies over 1 MHz it is conductivity of a material. For a long time in practice of electromagnetic shielding metal sheets have been considered traditional materials. However, a high level of shielding (more than 50-60 dB), serious technical problems arise in case of maintaining electrical hermeticity of a circuit. When this condition is not maintained, radiation, which has penetrated in the shielded volume, due to re-reflection from high-conductivity walls will form standing waves, whereas the shielding construction acts as a resonator at certain radiation frequencies.

Due to accumulation of energy in the chamber as in a resonator with a certain Q factor the power of electromagnetic radiation increases because of possible fissures, gappings between parts of the shield, holes and other non-uniformities of an electromagnetic circuit:

$$Q = 2\pi \frac{W_{\Sigma}}{W_1}, \quad (1)$$

where W_{Σ} is the electromagnetic energy accumulated in the formed circuit (resonator), W_1 is the energy dispersed during one period of radiation. The use of radio-absorbing materials in shielding constructions will make it possible to reduce the Q factor of a circuit, the accumulated energy of W_{Σ} and the field intensity in a circuit.

For the purpose of creating an electrical hermetic shielding circuit it is expedient to make a choice in favor of composite materials on the basis of polymeric binding and fillers on the basis of magnetic alloys (for example, the magnetoamorphous alloys containing Fe, Si, B, Cu) or ferrites characterized by high magnetic losses, technological effectiveness of manufacture and rather a low price. Shielding efficiency S is usually defined by the sum:

$$S = A + R + B, \quad (2)$$

where A is the weakening of radiation connected to absorption of electromagnetic energy within the shield; R is the value of losses caused by reflection of an electromagnetic wave from both sides of the shield; B is the value of losses connected to repeated re-reflections within the screen.

The use of small magnetic particles (for example, from a ferrite) in the capacity of a filler in the composite polymeric matrix (CPM) can be considered as a future-oriented study in the technology of electromagnetic shielding in the range of frequencies more than 1 GHz. Radio-absorbing materials on the basis of Ni-Zn ferrites are characterized by technological effectiveness of manufacture, small mass-dimensional characteristics (with the mass no more than 36 kg/m² and the thickness no more than 6 mm) and a wide interval of operating frequencies (10 MHz – 1GHz). In some cases Ni-Zn ferrites can be replaced with Mg-Zn ferrites whose price is about 30% less, and in whose composition there is no scarce oxide of nickel (III). These ferrites are effective in the range of frequencies 40 MHz – 1500 MHz. There are also compositions of Mn-Zn ferrites which do not contain scarce nickel and are close in their parameters to Ni-Zn ferrites.

Tendencies in creating RAC and RAM

At present it is possible to single out the following tendencies in increasing absorption of electromagnetic energy of RAC and RAM:

1. At the expense of increasing the imaginary part of dielectric permeability ϵ'' , which leads to an increase in dielectric losses of a material. However, an increase in conductivity and, thermal losses respectively, leads to an increase in reflection from the front surface of the material. To lower this conductivity it is expedient to use the interference phenomena. At a certain thickness of RAC the waves reflected from the front and from the back surfaces of RAC, will be in an antiphase, which means dependence of thickness of an absorbing layer on frequency. Therefore, acceptable values of the absorption coefficient can be achieved only at some fixed frequencies.

2. At the expense of increasing the imaginary part of magnetic permeability μ'' and magnetic losses. The magnetic fillers providing big magnetic losses are introduced into composite materials and amorphous alloys designed for shielding and absorption of electromagnetic energy. This tendency in creating RAM is rather promising. However, nowadays there are no theoretical models which satisfactorily describe absorption of electromagnetic radiation (EMR) as a function of parameters of the microstructure of the material and of the impressed electromagnetic field.

Available models are rather of a qualitative character [4]. Empirical formulas for calculation of the reflection coefficient and the thickness of layers are bulky, have many restrictions and assumptions and show high (to 50 %) miscalculation [4].

3. Due to coordination of wave resistances of a coating material with the propagation medium of electromagnetic waves. To lower the level of a signal reflected from the boundary interface and caused by a jump of the wave resistance, it is common to use multi-layer materials whose first layer has smaller ϵ and, consequently, smaller reflection from the boundary surface. The extreme cases are materials of the gradient type whose characteristics continuously change correspondingly with the depth of the material. For this purpose there are used constructions in the form of pyramids or truncated cones which provide a smooth change in electrical characteristics along the propagation of a wave.



Fig. 1. RAM of the gradient type [8]

The drawbacks of the above-mentioned constructions are the complexity of manufacture and the requirement for using RAM with the height about a wavelength in the material, which becomes critical for the task of lowering reflections in the range of frequencies below 1 GHz, especially in case of restrictions on the general dimensional characteristics. Besides, for materials of this type it is often necessary to use impregnation ensuring fire safety.

Spurious reflection from the boundary surface caused by the mismatch of wave resistances can be suppressed by introducing in the material a component with a nonzero imaginary part of magnetic permeability μ'' . And along with electroconductive fillers for creating RAM and RAC there are often used magnetic fillers (ferrite powders, carbonyl iron, etc.). In a number of works it is offered to use composite materials containing in a dielectric matrix (the foam polymeric composition) a fraction of a conductive filler in the form of extended inclusions (for example, of carbonic or metal fibers) together with fine-dispersed electroconductive and magnetic powders.

It is perspective to use ferrite fillers in radio absorbing materials, since the material has considerable magnetic losses and great values of magnetic conductivity μ'' make it possible to provide the best coordination of metal and strongly absorbing layers with free space [4].

A considerable number of publications in Russia and abroad deals with creation of new forms of ferrite fillers and shared use of ferrite powders, graphites and metal fibers. For example, in [5] it is offered to use RAM which contains in the capacity of polymeric binding synthetic glue on the basis of latex, and in the capacity of a magnetic filler – a powdery ferrite or carbonyl iron.

4. Due to the interference of reflections from the different coating layers, leading to reduction in reflection from the material (multi-layer coatings and coatings with a special-purpose form). Here complex wave resistance Z^* also decreases correspondingly with the depth of the coating. It allows avoiding sharp jumps of wave resistance and, therefore, unwanted reflections.

The simplest variety of such a structure is a two-layer coating from a material with non-uniform conductivity, where the top layer with smaller σ values is often called the coordinating one, and the bottom layer with big σ values is called the absorbing one. Formulas for calculating the absorption coefficient for multi-layer coatings contain a large number of interconnected frequency-dependent parameters and serve, as a rule, for the qualitative analysis of the factors influencing the absorption coefficient.

5. Due to the interference minimum of the waves reflected from the surfaces of ferrite RAC and the metal shield on which coating plates are pasted. The coating thickness is defined by the wavelength of the incident radiation. In RAM the wavelength decreases by $\sqrt{\epsilon\mu}$ times. The interference minimum of reflection corresponds to the thickness of a plate which is equal to one fourth of the length of an electromagnetic wave in a ferrite:

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (3)$$

where λ_0 is the wavelength in vacuum, ϵ and μ are dielectric and magnetic permeability of RAM.

An increase in magnetic and dielectric permeability reduces the length of the electromagnetic wave and makes it possible to reduce the thickness of plates, which is especially important at low frequencies.

The attenuation coefficient of the reflected electromagnetic radiation depends to a great extent not only on the interference phenomena under the reflection of electromagnetic waves, but also on the processes of absorption of electromagnetic radiation as a result of the resonant phenomena.

Theoretical grounds for creating RAM

As electromagnetic absorption we understand electrical and magnetic losses in the material, occurring due to relaxation processes. The energy transferred to the system will be distributed between corresponding types of oscillation whose amplitudes will accept values corresponding to the thermodynamic equilibrium. Relaxation processes will determine the speed of the decay of oscillation amplitudes excited by external forces. If the system is under the influence of periodic external forces, relaxation processes exercise the continuous outflow of energy from the primary types of oscillation and provide the possibility of the continuous absorption of the energy from external forces by the system.

Relaxation processes in this case define the dissipative characteristics of the system. In [6] there are presented mathematical models of the spin-spin, spin-lattice, ionic relaxation, relaxation with involvement of current carriers, depending on the particles participating in the process of redistribution of energy. Isolation of several types of relaxation is conditional since all particles are connected by forces of interaction and participate in the process of energy redistribution at the same time. However such isolation appeared because of the complexity in the description of the relaxation process in a polycrystalline material as a whole.

The strongest absorption of energy is connected with the resonant phenomena in ferrites. Of the greatest interest are the resonance of domain boundaries (RDB) and a natural ferromagnetic resonance (NFMR) which are described by the equations of Dering and Landau-Lifshitz respectively [6]. These equations are almost postulated but for the solution of practical tasks it is expedient to use equations received empirically.

It is ascertained that processes of displacement of domain boundaries have a decisive impact on many physical properties of magnetic-ordered crystals. Non-linear processes of dynamic conversion of magnetization in the system of spins localized in a domain boundary define methods of dissipation of energy brought to the domain boundary from the outside [6].

It is known that magnetic losses of ferrite RAM in the range of frequencies 10 – 100 MHz are to a considerable degree caused by the processes of the resonance of domain boundaries (RDB) leading to the outflow of external electromagnetic energy, due to energy redistribution between the electrons which form domain boundaries. For the phenomenological description of RDB the equation of Dering is used [7]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \rho \frac{dx}{dt} + \xi x = M_0 H, \quad (4)$$

where m is the effective mass of the domain boundary, x is the boundary coordinate, ξ is the coefficient of "magnetic" elasticity depending on the initial magnetization and the sizes of domains; ρ is the generalized dissipative coefficient characterizing irreversible losses of energy in the system when it is acted upon by the generalized force of $M_0 H$ from an outside magnetic field; M_0 is the magnetization of saturation, H is the magnetic field intensity.

Drawing an analogy to the harmonic oscillator, it is possible to conclude that an increase in the effective mass of domain boundaries (and of an average grain size) will lead to lowering the frequency of RDB:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\xi}{m}}, \quad (5)$$

which is important for extension of the operating range of ferrite RAM.

The range of a magnetic susceptibility determined by the resonance of domain boundaries can be described by the expression:

$$\chi = \chi_0 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} - j \frac{\omega}{\omega_{rel}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

where χ_0 is the initial static susceptibility, ω_{rel} is the frequency of relaxation of boundary displacement; it is proportional to m^{-1} and can characterize mobility of the domain boundary. The level of absorption of electromagnetic radiation reaches its maximum near the frequency of their natural oscillations. The condition for initiation of the resonance is rigid fixation of domain boundaries on grain boundaries, pores or other defects, which provides reversible displacement of their sections relative to the equilibrium position. The frequency of natural oscillations of domain boundaries ω_0 is defined by the effective mass of the domain boundary m and the stiffness coefficient ξ , which characterizes the quasielastic force operating on the crystal wall.

From the formula (5) it follows that an increase in the mass of a domain boundary allows to reduce the resonance frequency and to expand in this way the frequency interval of absorption of a ferrite. As the mass of a domain boundary is to some extent a measure of its inertness and it is approximately pro-

portional to the surface area of the boundary [8, 9], formation of coarse-grained structure shall lead to reduction in the resonance frequency of domain boundaries, whereas the spread of grains sizes shall lead to an increase in the width of the resonance curve (Fig. 2).

Formation (at grain boundaries) of dislocations, inclusions and atoms different in their sizes and electrochemical potential from cations which are a constituent part of a ferrite increases friction losses, that is the dissipative component ρ in the equation (4) (Fig. 3). The pictures on Fig. 2 and Fig. 3 are made on the scanning microscope from the company «Carl Zeiss Jena».

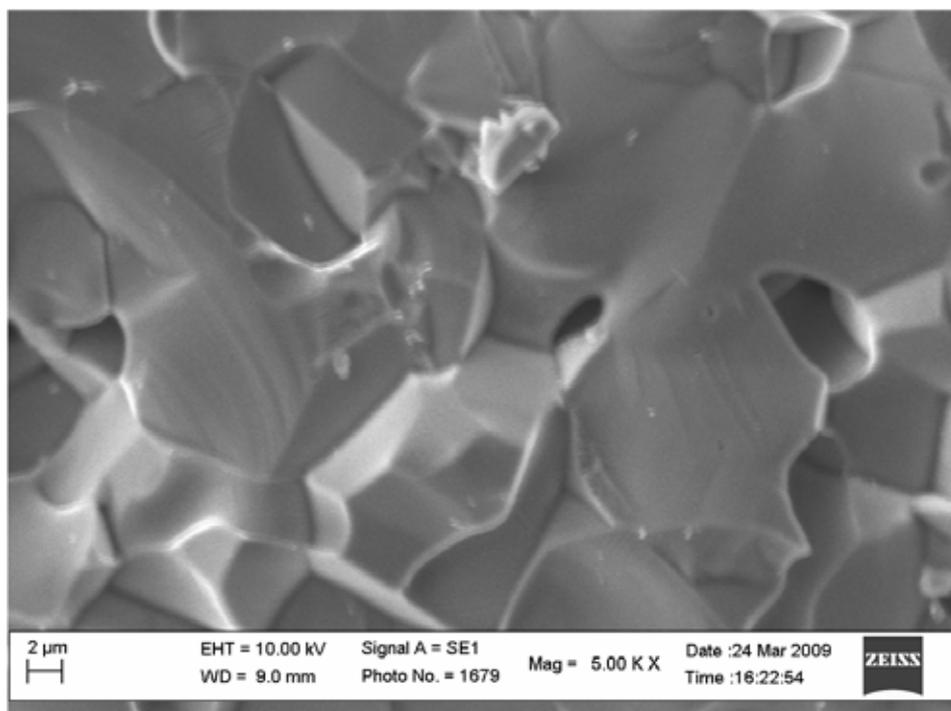


Fig. 2. An example of microstructure of a Ni-Zn ferrite with the spread of grains according to their sizes

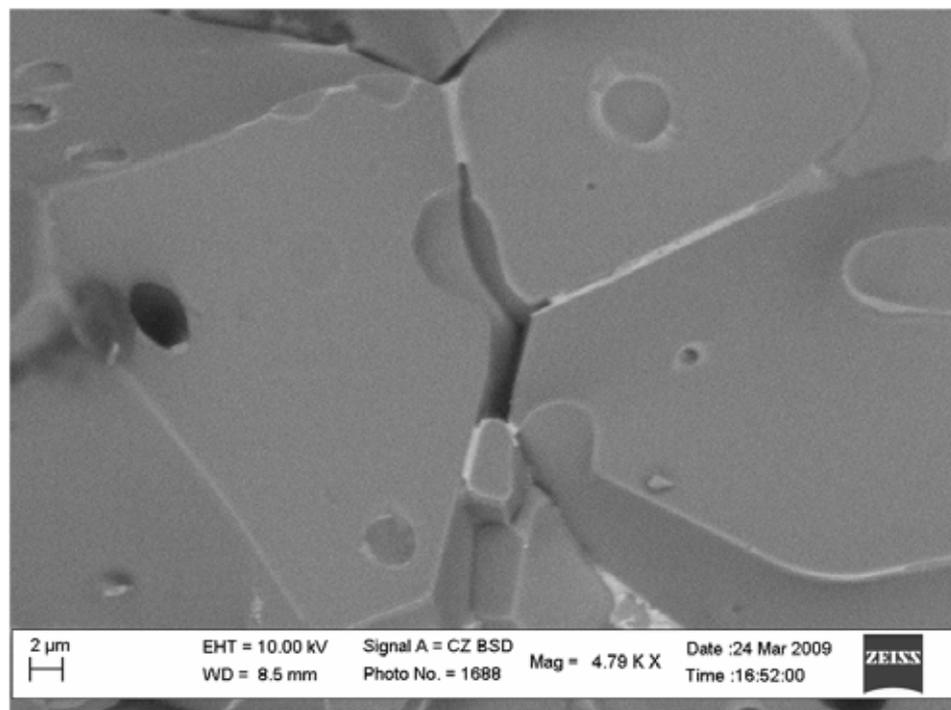


Fig. 3. Microstructure of a batch of Ni-Zn ferrites with addition of bismuth. Being larger than cations of Fe^{2+} and Ni^{2+} , ions of Bi^{3+} are ejected from the lattice and are located at grain boundaries (white inclusions)

Losses at higher frequencies (10^{10} – 10^{11} Hz) are caused by the natural ferromagnetic resonance (NFMR) and connected with the internal field of the magnetic anisotropy. NFMR is initiated under coincidence of the frequency of an outside electromagnetic field with the precession frequency of rotational axes of electrons. The magnetic moment of an atom is developed from the spin and orbital magnetic moments, the spin moment considerably exceeding the orbital one. NFMR can be called the spin resonance and it can be treated as "tilting" of the magnetic spinning top. This "tilting" occurs when the frequency ω of an outside high-frequency field H , perpendicular to the precession axis (that is to the anisotropy field H_A), matches the resonance frequency ω_0 . The resonance frequency is connected with the intensity of an internal field of anisotropy through a gyromagnetic ratio γ :

$$\omega_0 = \gamma H_A, \quad (7)$$

H_A – the intensity of the anisotropy field is defined by the formula:

$$H_A \approx \frac{K}{M_0}, \quad (8)$$

where K is the constant of crystallographic magnetic anisotropy. It depends on the composition of a ferrite and the nature of cationic distribution and defines the rigidity of domain boundaries. With an increase of K , the frequency of NFMR moves towards upper frequencies.

Next to the NFMR frequency there occurs dispersion – dependence of the magnetic susceptibility on the frequency of an outside field, as well as maximum of absorption of electromagnetic energy. In this case the power P of the absorbed energy of the alternating field is proportional to the imaginary component of magnetic susceptibility χ'' :

$$\chi^* = \chi' + j\chi'', \quad (9)$$

$$P = \omega \chi'' H^2. \quad (10)$$

The occurrence of attenuation leads to some shift in the resonance frequency. Ferromagnetics show the biggest resonance absorption as they possess considerable spontaneous magnetization.

Anisotropy is connected with the finite sizes of the sample under research and its domain structure which is characterized by different directions of spontaneous magnetization. Thus, for estimation of the resonance frequency in a ferromagnetic it is necessary to take into account all its internal magnetic fields which can also be caused by mechanical stresses – because of the magnetostriction phenomenon. All the specified factors will promote broadening the band of the resonance frequency [10]:

$$\gamma H_A \leq \omega \leq \gamma H_A + 4\gamma\pi M_0, \quad (11)$$

where γ is the gyromagnetic ratio, M_0 is the magnetization of saturation;

The outflow of energy from an outside field also depends on relaxation processes. For example, in case of Ni-Zn ferrites substitution of bivalent ions of nickel with bivalent ions of iron in octahedral nodes leads to appearance of additional electrons, since Fe^{2+} ions have one "free electron" in comparison with Fe^{3+} ions. Such electrons, moving freely moved on the octahedral sublattice, will accelerate processes of energy redistribution. At the same time there occurs the broadening of the resonance line.

The width of the resonance line is influenced even by small amounts of impurity, porosity, magnetic anisotropy, the presence of two or more sorts of magnetic atoms in the lattice. On the contrary, the narrow line is peculiar for monocrystals and structures which are the most similar to the ideal ones.

Methods of measuring the reflection coefficient of RAM

The measurements of reflection coefficients in the short circuit mode in the samples of different width on the metallic plate in the range of frequencies from 0,3 to 1300 MHz are conducted on the laboratory bench, created on the base of the complex transmission measuring set «Obzor 103» in combination with the computer system of the signal registration and processing.

The samples are placed into the coaxial measuring cell with the net section in the sample positioning area 16/6.95 mm, matched with the coaxial measuring circuit.

The calculation of the complex magnetic permeability is carried out in accordance with the developed procedure, on the basis of the «short circuit – idle running» method [10].



Fig. 4 Measuring set «Obzor 103»

On the basis of mathematical processing of the measured reflection coefficient there are defined complex components of magnetic and dielectric permeability, that is, they are defined indirectly and their measurement has an evaluation character. The measurement method in a coaxial strip-line waveguide transmission line is acceptable for the low frequency range with a big wavelength.

For higher frequencies the horn-type method is used. In its section the horn has the form of a square whose side is proportionate to the wavelength with which the experimental sample of RAM or RAC is irradiated. For this reason it is difficult to measure the radio absorption coefficient at low frequencies by the horn-type method. For example, at 300MHz the length of the horn side is equal to 1m, and to make a horn for frequencies in digits and tens of MHz appears quite difficult.

In both methods the reflection coefficient is considered to be a decimal logarithm of the ratio of the power of the reflected wave to the power of the falling one.

Perspectives on creating new RAM

The tendency towards miniaturization of technical aids and transition to power supply units with SHF requires creation of RAC at the GHz range. As a rule, they are coatings from amorphous alloys containing Fe, Ni, Co whose thickness is several microns. These coatings are made by the evaporation method or by the application of melts onto fabric, film or other bases.

The technological process of manufacturing metalized tapes consists in pouring out the melt of the specified metals on the rotating barrel, from which there comes out a tape from an amorphous alloy 20 mm wide. The samples of tapes are cut in bands 50 to 250 cm long. From the bands (by placing bands with overlapping) a packet is formed 10 to 30 cm wide. The size of overlapping is 1 to 3 mm. After that the formed packet is laminated on the AR-320 laminator.

It should be noted that the suggested method makes it possible to obtain packages of any length.

The enterprise produces shields for power cables, vests for protection of welders and of the maintenance personnel for offshore structures and sea-going vessels.

Fabrics with sputtering of Ni and Co acquire metal brightness and become attractive for fashion designers.

If in the required range of absorption there appear megahertz frequencies, the thickness of RAM becomes quite considerable and sometimes can be commensurable with human height.

Such bulky materials used in anechoic chambers reduce the workspace. Besides, they are difficult to mount, contain toxic components and are costly.

The range from 10 to 400 MHz is the most problematic absorption region of electromagnetic energy in RAM and RAC. As this range corresponds to RDB (resonance of domain boundaries) frequencies in Ni-Zn and Mg-Zn ferrites, these specified materials are perspective for the megahertz range. For this reason the study of the resonant phenomena in ferrites, resonance of domain boundaries in particular, is quite urgent.



Fig. 6. Ultra wide-range absorber of the TDK company is as high as a pyramid of 1250 мм

To extend the absorption frequency range at frequencies less than 30 MHz it is necessary to develop new ferrite materials with a combination of high values of magnetic and dielectric permeability and with considerable manifestations of RDB. Along with Ni-Zn and Mg-Zn ferrites Mn-Zn ferrites are also rather perspective.

It is necessary to develop scientific bases for creation of broadband absorbers on the basis of ferrite materials, including powders on the basis of polymeric binding, as well as carry out mathematical simulation of the accumulated experimental data for the purpose of controlling radio-absorbing properties of RAM.

Acknowledgments

The author wishes to express her deep gratitude to a small team of researchers: S. Bibikov, M. Prokofiev, V. Andreev, who provided experimental data for this review. The author wants to express special thanks to the translator A. Klimau who performed the painstaking work of translating the text into English.

References

1. О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств : федер. закон № 4689-11 ГД от 01.12.1999.
2. From neuron to brain / John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace, Paul A. Fuchs. – Moscow : Librokom, 2012. – 672 p.
3. Безэховая камера. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Безэховая_камера
4. Krutogin, D. G. Elements and devices of magnetoelectronics. Laboratory workshop / D. G. Krutogin. – Moscow : MISA, 2008. – 81 p.
5. НИИ «Радиострим». – URL: <http://www.radiostrim.ru>
6. Gurevich, A. G. The Magnetic resonance in ferrites and antiferromagnetics / A. G. Gurevich. – Moscow : Science, 1973. – 573 p.
7. Smit, J. Ferrites / J. Smit and H. P. J. Wijn. – New York : John Wiley, 1959. – 290 p.
8. Gurevich, A. G. Magnetic oscillations and waves / A. G. Gurevich, G. A. Melkov. – Moscow : Science, 1994. – 464 p.
9. Pokusin, D. N. Complex Magnetic Susceptibility of Ferrites Near the Natural Ferromagnetic Resonance / D. N. Pokusin, E. A. Chukhlebov, and Yu. Zalesskii // Radiotekh. Elektron. – 1991. – Vol. 36, no. 11. – P. 2085 [J. Commun. Technol. Electron. (Engl. Transl.), 1991, vol. 36, no. 11, np].
10. Brandt, A. A. Research in dielectrics at ultrahigh frequencies. – Moscow : Fizmatgiz, 1963. – 404 p.

Меньшова Светлана Борисовна

кандидат технических наук, старший преподаватель,
Кузнецкий институт информационных
и управленческих технологий
(филиал Пензенского государственного
университета)
(442543, Россия, г. Кузнецк, ул. Маяковского, 57а)
E-mail: savva_72@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Согласно закону РФ «О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств» ужесточаются требования к уровню электромагнитного излучения выпускаемых электронных и электрических приборов. Испытания на соответствие требованиям проводятся в безэховых камерах, стены которых облицованы радиопоглощающими покрытиями (РПП) и радиопоглощающими материалами (РПМ), необходимыми для защиты персонала и измерительных приборов от преотраженного электромагнитного излучения (ЭМИ). *Материалы и методы.* В данной работе дан аналитический обзор назначения современных радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий (РПП), теоретических основ и тенденций их создания. *Результаты.* Выявлены основные тенденции увеличения поглощения электромагнитной энергии: 1) за счет увеличения мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' ; 2) за счет увеличения мнимой части магнитной проницаемости μ'' ; 3) за счет согласования волновых сопротивлений материала покрытия со средой распространения электромагнитной волны; 4) за счет интерференции отражений от разных слоев покрытия; 5) за счет интерференционного минимума волн, отраженных от поверхностей ферритового РПП и металлического экрана, на который наклеены пластины покрытия. Представлены способы измерения коэффициентов отражения РПМ, теоретические основы, а также перспективы создания РПМ и РПП. *Выводы.* Отмечено, что необходимо разрабатывать научные основы создания широкополосных поглотителей на основе ферритовых материалов.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, мнимая часть диэлектрической и магнитной проницаемости, координация волнового сопротивления, минимальное вмешательство, резонанс доменных границ, естественный ферромагнитный резонанс, ферритовые радиопоглощающие материалы.

Men'shova Svetlana Borisovna

candidate of technical science, senior lecturer,
Kuznetsk Institute of information
Technology and Management
(branch of Penza State University)
(442543, 57a, Mayakovsky street, Kuznetsk, Russia)

Abstract. *Background.* According to the Act of the Russian Federation "About the state regulation in the field of ensuring electromagnetic compatibility of technical means", requirements for the level of electromagnetic radiation of available electronic and electrical appliances become tougher. Tests for compliance with the requirements are carried out in the anechoic chambers whose walls are coated with radio-absorbing materials (RAM) and radio-absorbing coatings (RAC) necessary for the protection of the personnel and measuring devices against the re-reflected electromagnetic radiation (EMR). *Materials and methods.* This work deals with the analytical survey of the designation of contemporary RAM and RAC, theoretical principles of RAM electromagnetic losses. *Results.* There have been identified the major tendencies of increasing absorption of electromagnetic energy: 1. At the expense of increasing the imaginary part of dielectric permeability ϵ'' . 2. At the expense of increasing the imaginary part of magnetic permeability μ'' . 3. Due to coordination of wave resistances of a coating material with the propagation medium of electromagnetic waves. 4. Due to the interference of reflections from the different coating layers, leading to reduction in reflection from the material (multi-layer coatings and coatings with a special-purpose form). 5. Due to the interference minimum of the waves reflected from the surfaces of ferrite RAC and the metal shield on which coating plates are pasted. There have been set forth theoretical principles, as well as prospects of producing radio-absorbing materials and coatings. *Conclusions.* It is necessary to develop scientific bases for creation of broadband absorbers on the basis of ferrite materials, including powders on the basis of polymeric binding, as well as carry out mathematical simulation of the accumulated experimental data for the purpose of controlling radio-absorbing properties of RAM.

Key words: electromagnetic screening, imaginary part of dielectric and magnetic permeability, coordination of wave resistance, interference minimum, resonance of domain boundaries, natural ferromagnetic resonance, ferrite radio-absorbing materials.

УДК 614.875: 537.874.7: 621.318.1

Menshova, S. B.

Tendencies in creating modern radio absorbing materials and coatings / S. B. Menshova // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 51–59. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-8.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДКЛАДКЕ

С. А. Воронов, Н. А. Гордийко,
А. Т. Богорощ, А. Г. Шайко-Шайковский

Введение

В последние годы ведется интенсивная разработка полевых транзисторов на структурах металл-сегнетоэлектрик-полупроводник с целью их использования как энергонезависимых элементов памяти. Принцип работы таких приборов состоит в следующем [1–3]. Пленка сегнетоэлектрика вмещает в себя большое количество доменов, имеющих определенный вектор электрической поляризации. Суммарная поляризация отдельных доменов дает произвольную (спонтанную) поляризацию пленки (отличный от нуля результирующий дипольный момент единицы объема образца). Модуль и объемная ориентация спонтанной поляризации могут быть изменены вследствие влияния внешнего электрического поля. В сильных полях пленка становится однодоменной. Приложение сильного электрического поля противоположного направления на некотором участке поверхности может привести к реполяризации доменов сегнетоэлектриков (СЭ) пленки в границах этой плоскости, которые подпадают под регистрацию. Таким образом, эффект поляризации в СЭ пленках дает возможность создать энергонезависимые приборы памяти, носителями информации в которых являются домены реполяризации. Такие приборы имеют ряд преимуществ перед традиционно используемыми магнитными и оптическими носителями информации.

Целью данной работы является изучение возможности использования СЭ пленок сложных оксидов, нанесенных по оригинальной технологии на кремниевую подкладку, как регистрирующие среды информации во внешних приборах памяти.

Методика эксперимента

Известно, что физические свойства СЭ пленок существенно зависят от состояния их поверхности, а также – поверхности кремниевой подкладки, стехиометрии, кристалличности, плотности, микроструктуры, кристаллографической ориентации и наличия структурных дефектов, а значит – от методов получения пленок [3, 4]. Это приводит, с одной стороны, к существенной разнице между параметрами массивных и пленочных сегнетоэлектриков, а с другой – к большому разбросу характеристик самих пленок [1, 4].

Основные требования к тонким СЭ пленкам состоят в том, чтобы: 1) пленка и подкладка имели приблизительно одинаковые температурные коэффициенты расширения; 2) материалу пленки была присуща хорошая адгезия к подкладке; 3) эффект памяти был значительным. Указанным требованиям удовлетворяют материалы типа PbTiO_3 , BST. Как подкладка, на которую наносились исследуемые пленки, использовались диски из монокристаллического кремния.

При выращивании тонких пленок сложных оксидов необходимо учитывать определяющее влияние на степень упорядоченности структуры вакуумных конденсатов, температуры кремниевой подкладки, особенно при наличии химически активных и летучих компонентов (например, свинца) [3]. Из-за этого оптимальные технологические режимы получения СЭ пленок сложных оксидов выбирались путем варьирования температуры кремниевой подкладки, давления кислорода в вакуумной камере и расстояния между мишенью и подкладкой из кремния.

Тонкопленочную металлическую композицию получали методом магнетронного напыления слоев металлов Ti и Pb с двух отдельных магнетронов в едином технологическом цикле, предварительно снизив давление в камере до величины $P = 0,25$ Па. Как распыливающий газ использовали аргон. Скорость напыления титана при рабочем давлении $P = 0,16$ Па, токе анода $I = 0,5$ А составляла 0,35 нм/с, скорость напыления свинца при $P = 0,27$ Па, $I = 0,2$ А была 2,5 нм/с. Раздельное напыление металлов позволило формировать структуры заданной толщины с разной последовательностью металлических слоев. Как подкладки использовался монокристаллический Si (100). Объектами исследования были тонкопленочные структуры двух типов (Pb/Ti/Si и

Ti/Pb/Si) с толщиной слоев металлов ~500 нм. Термообработка тонкопленочных структур свинец-титан (титан-свинец) проводилась в кварцевом реакторе печи резисторного нагрева при $T_1 = 450$ К и $T_2 = 950$ К с продолжительностью каждой стадии отжига равной 15 мин при расходе кислорода 35 л/час. Толщина выращенных пленок контролировалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 и составляла 400 ± 50 нм.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ образцов СЭ пленок определялась по известной методике [1, 2] на мостике емкостей Е8-2 с использованием внешнего генератора (низкочастотного генератора Г3-33) и нуль-индикатора Ф582. Измеряемое поле выбиралось минимально допустимым из соображений чувствительности и помехоустойчивости. Измерения проводились при частоте измеряемого поля 1000 Гц.

Методика измерений

Использовалась четырехпозиционная вакуумная установка для нанесения магнетронным распылением многослойных и многокомпонентных пленок. Установка обеспечивает проведение разных процессов нанесения пленок 0,1–5 мкм толщиной на подкладки диаметром (60–200) мм, а также на квадратные или прямоугольные с линейными размерами (30–200) мм. Установка имеет четыре рабочих позиции: шлюзование и нагревание, ионное очищение поверхности подкладок, магнетронное распыление материалов с трех мишеней малого диаметра. При напылении многокомпонентных (трехкомпонентных) пленок заслонка снимается, распыление проводится одновременно с трех мишеней из разных материалов. Регулированием подаваемой на каждую мишень мощности изменяется состав компонентов материала в осаждаемой пленке.

Фазовый состав пленок определялся методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-3М (излучение CuK_α) в интервале углов 20–65°. Поверхностная морфология пленок и граница раздела пленка-подкладка исследовались с помощью растровой электронной микроскопии. Для измерения электрофизических свойств пленок методом магнетронного напыления в вакууме через маску с отверстиями 1 мм наносился верхний никелевый электрод, нижний контакт с кремниевой пластиной осуществлялся индий-галиевой эвтектикой. Петли диэлектрического гистерезиса измерялись при напряжении 0,5 В и измеряемой частоте 50 Гц.

По дифрактограммам пленок определялись параметры элементарной ячейки (расщепления пика, который соответствует спонтанной деформации, не наблюдалось), тип текстуры, величина микродеформации Ad/d (где d – межплоскостное расстояние) и размеры областей когерентного рассеивания D . Точность определения параметра элементарной ячейки лимитировалась шириной отражения и составляла $\pm 0,0003$ нм. Тип текстуры (основная ориентация кристаллов) оценивался отклонением относительных интенсивностей отражений от стандартного (поликристалл). Структурно-деформационные характеристики Ad/d и D , традиционные для рентгенографии [5], использовались для описания качества кристаллизации пленок. Величины Ad/d и D по ширине рентгеновских отражений определялись стандартным методом аппроксимаций [6]. Ошибки определения Ad/d и D не превышали 15 и 30 % соответственно. Метод не позволил установить размеры областей когерентного рассеивания менее 100 нм.

Вольт-фарадные характеристики изучаемых структур определялись с помощью методики, изложенной в [7], при использовании электростатического зонда на стенде, схема которого представлена на рис. 1. В качестве зонда использовался специально изготовленный методом электрохимической заточки вольфрамовой проволоки зонд с радиусом закругления острия $0,5 \pm 0,03$ мкм. Контроль этого параметра зонда проводился с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Для контроля восстановления СЭ свойств пленок сложных оксидов, напыленных на кремниевые подкладки, вольт-фарадные характеристики измерялись в трех произвольных точках, размещенных на разных расстояниях от центра кремниевой пластины.

Разделительная способность изучаемых структур определялась по следующей методике [7]. Закрепленный на измерительном стенде (рис.1) образец перемещался с шагом 0,4 мкм относительно вольфрамового зонда. Перемещение образца контролировалось с помощью отсчетно-измерительной системы с механотронным преобразователем. Процесс записи проводился подачей на зонд импульсов напряжения ($U = \pm 80$) В. Наличие записанной информации определялось путем измерения девиации частоты генератора повторения с помощью частотомера ЧЗ-63/3 при перемещении образца с шагом 0,1 мкм в начальное положение. По результатам измерений строился

график зависимости девиации частоты генератора повторения от перемещения исследуемого образца относительно вольфрамового зонда.

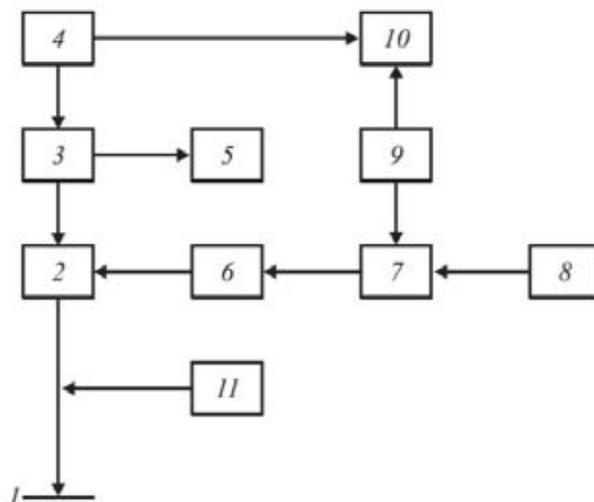


Рис. 1. Структурная схема измерительного стенда:

- 1 – диск с зондом записи-повторения; 2 – ключ переключения режимов записи-повторения;
- 3 – генератор повторения ($20 \leq \nu \leq 50$ МГц); 4 – источник питания генератора Б5-47 (0–15 В);
- 5 – частотомер ЧЗ-63/3; 6 – ключ изменения полярности импульсов; 7 – импульсный усилитель;
- 8 – генератор Г6-25; 9 – источник постоянного напряжения Б5-3050;
- 10 – прибор комбинированный цифровой Ц4313; 11 – блок точного позиционирования (шаг 0,1 мкм)

Скорость реполяризации исследуемых СЭ пленок определялась в соответствии с методикой, предложенной Мерцем [8].

Результаты и их обсуждение

При исследовании температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости пленок сложных оксидов, полученных на кремниевых подкладках, был выявлен максимум на кривой $\epsilon(T)$ в районе ожидаемой температуры СЭ фазового перехода объемных материалов [1] (рис. 2). Однако этот максимум крайне незначителен и размыт в широком температурном интервале. Дифрактограммы исследуемых структур представлены на рис. 3.

На рис. 3,а представлены результаты исследования монокристалла кремния (срез (100)). На нем зафиксировано отражение от плоскости (200) с углом $2\theta = 41,9^\circ$, а также группа линий в области углов $30\text{--}31^\circ$, которые принадлежат неустановленным соединениям кремния (возможно, SiO_2 – α -кварц; SiO).

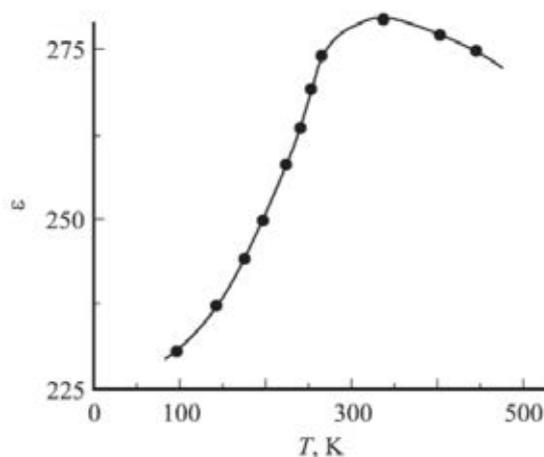


Рис. 2. Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости изучаемых пленок $\epsilon(T)$

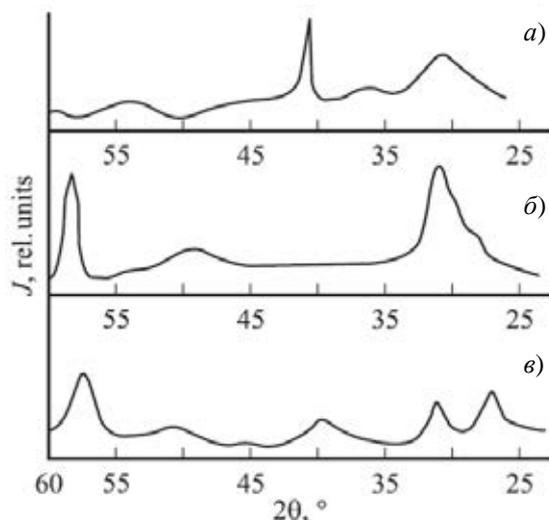


Рис. 3. Дифрактограммы изучаемых материалов:
a – монокристалл кремния (срез (100)); *б, в* – композиция диэлектрик-оксид кремния-кремний
 (толщина диэлектрика 0,4 и 0,6 мкм соответственно)

На рис. 3,б представлена дифрактограмма композиции диэлектрик-оксида кремния-кремний. Пленка диэлектрика сильно текстурирована (четкое только отражение $2\theta = 57,2^\circ$). Дифракционный максимум в области, которая соответствует оксидам кремния, значительно интенсивнее, что свидетельствует об увеличении толщины оксидного слоя. Ориентация кристаллографического направления грани пленки не совпадает с ориентацией плоскости (100) кремния, поэтому отражение от плоскости (200) кремния отсутствует. Пленка имеет небольшую толщину (порядка 0,5 мкм). Повышенный фон можно пояснить тем, что пленка пребывает в стадии коалесценции.

Рисунок 3,в соответствует структуре, аналогичной той, что представлена на рис. 3,б, однако в этом случае СЭ пленка имеет толщину 5,3 мкм. Наличие отражений от плоскостей (100), (110), (200) свидетельствует об усилении разблокирования текстуры.

Результаты определения вольт-фарадных характеристик, полученных в трех произвольных точках исследуемого образца, представлены на рис. 4.

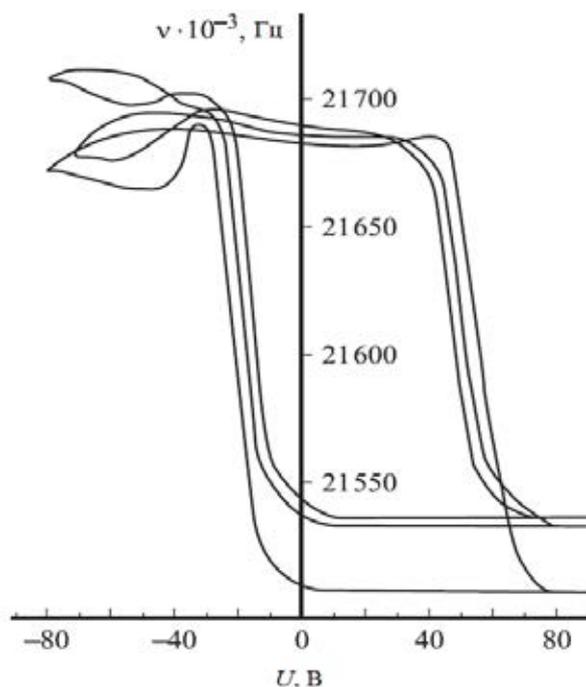


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики, полученные в трех произвольных точках исследуемого образца

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение емкостей напыленного слоя составляет 0,01–0,02 пФ (в измеряемых единицах 25–35 кГц). Изменение амплитуды сигнала по плоскости исследуемого образца связано: 1) с неоднородностью толщины, а значит, и емкости напыленного диэлектрического слоя; 2) неравномерностью распределения структурных дефектов, которые уменьшают меру упорядоченности структуры пленки; 3) неоднородностью полей упругих механических напряжений по толщине пленки, которые возникают из-за неравномерности нагрева кремниевой подкладки при формировании пленок сложных оксидов. Указанные причины вызваны проблемами технологического характера, которые можно ликвидировать при соответствующей доработке технологической оснастки и режимов получения пленок сложных оксидов. Изменение емкости обедненного слоя кремния, сравнительно со сменой емкости напыленной пленки, было очень незначительным (не превышало 0,003 пФ) и практически не влияло на величину эффекта памяти.

График зависимостей девиации частоты генератора повторения от перемещения исследуемого образца относительно вольфрамового зонда представлен на рис. 5. В результате эксперимента было установлено, что разделительная способность исследуемых структур при их взаимодействии с вольфрамовым зондом, имеющим радиус закругления острия 0,4 мкм, не менее 0,7 мкм, указывает на реальную возможность достижения плотности записи информации 10^{12} – 10^{13} бит/м².

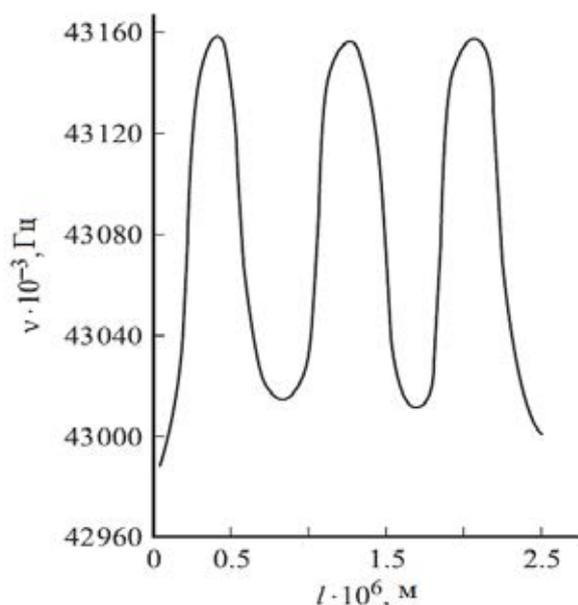


Рис. 5. Результаты измерения разделительной способности исследуемых структур

Результаты определения скорости переполяризации исследуемых пленок сложных оксидов представлены на рис. 6. Полученные данные свидетельствуют о том, что время переключения доменов в исследуемых СЭ пленках составляет величину меньшую, чем 100 нс.

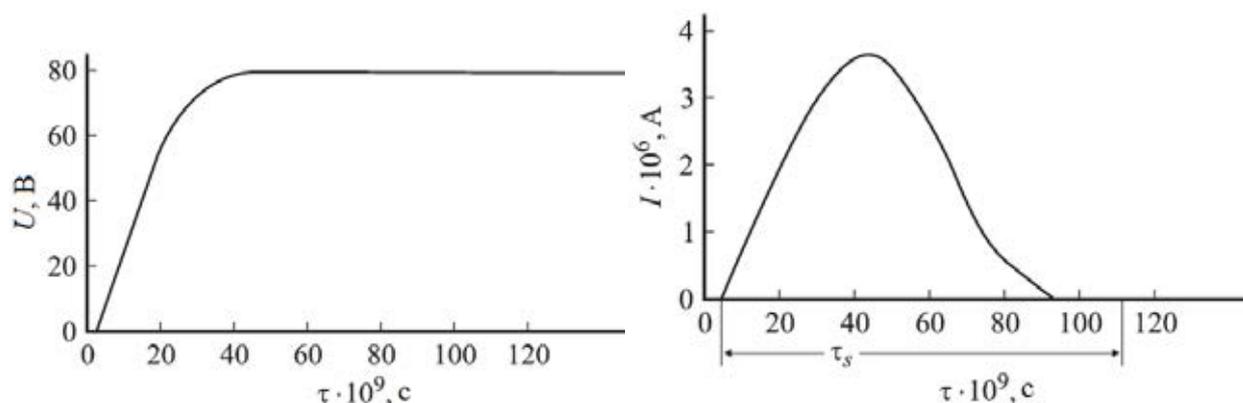


Рис. 6. Временные зависимости наложенного электрического напряжения U и тока I

Изменение амплитуды повторенного сигнала во времени соответствует логарифмическому закону (рис. 7). Экстраполяция полученной зависимости в область больших временных величин свидетельствует о том, что через 10 лет ($t \approx 3 \cdot 10^8$ с) сохранения информации амплитуда воспроизведенного сигнала составляет более 50 % от начального значения. Это является полностью приемлемым результатом для регистрирующих сред энергонезависимых носителей информации.

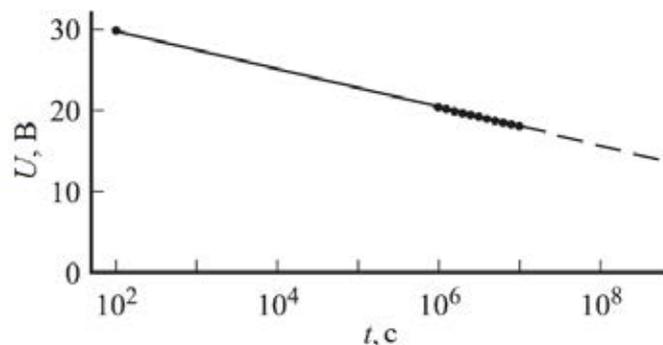


Рис. 7. Зависимость изменения амплитуды электрического сигнала от времени

Выводы

Из полученных данных следует, что исследуемая пленка как минимум до толщины 0,5 мкм имеет структуру перовскита, причем материал пленки характеризуется высокой степенью текстурирования.

Представленные на рис. 3 данные относятся к упорядоченным кристаллическим пленкам с наибольшей степенью кристаллизации, что характеризуется следующими значениями структурно-деформационных параметров: размеры областей когерентного рассеивания $D > 100$ нм; величины микродеформации $Ad/d \sim 0,01$. Степень упорядоченности структуры пленок можно было варьировать с помощью изменения температуры кремниевой подкладки. В частности, уменьшение этой температуры производило к разупорядоченности структуры. Дальнейшие исследования свойств пленок сложных оксидов, сформированных при разных температурах кремниевых подкладок, показали, что процесс разупорядочения структуры пленок сопровождается деградацией их СЭ свойств.

Значения коэрцитивного поля и спонтанной поляризации полученных пленок 2000–2500 нм толщиной составляли $E_c = 4,5$ кВ/см, $P_s = 16,2$ мкКл/см².

Электрофизические исследования рассмотренных структур показали принципиальную возможность их использования как регистрирующих сред носителей информации внешних устройств памяти.

Список литературы

1. Мясников, Э. Н. Эффект памяти в сегнетоэлектрических пленках BST на кремниевой основе / Э. Н. Мясников, С. В. Толстоухов, К. Ю. Фроленков // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, вып. 12. – С. 2193–2199.
2. Мухортов, В. М. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение / В. М. Мухортов, Ю. И. Юзюк. – Ростов н/Д : ЮИЦ РАН, 2008. – 224 с.
3. Воротилов, К. А. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / К. А. Воротилов, В. М. Мухортов, А. С. Сигов ; под ред. чл.-корр. РАН А. С. Сигова. – М. : Энергоатомиздат, 2011. – 175 с.
4. Особенности рор-спектроскопии тонких пленок перовскитов / М. С. Афанасьев, А. В. Буров, В. К. Егоров, П. А. Лучников, Г. В. Чучева // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 1 (2). – С. 126–133.
5. Наноразмерные сегнетоэлектрические пленки для интегральных запоминающих элементов / Г. И. Клето, Я. В. Мартынюк, А. И. Савчук, В. Н. Стребежев, Ю. К. Обедзинский // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2009. – Т. 7, № 1. – С. 65–71.
6. Parameters of Domain Boundaries in Thin PbTiO₃ Films / A. S. Sidorkin, L. P. Nesterenko, A. L. Smirnov, G. L. Smirnov, A. A. Sidorkin and S. V. Ryabtsev // Ferroelectrics. – 2007. – Vol. 359, № 1–6. – P. 341–343.
7. Microstructure and enhanced in-plane ferroelectricity of Ba_{0,7}Sr_{0,3}TiO₃ thin films grown on MgAl₂O₄ (001) single-crystal substrate / X. Y. Zhou, T. H. Heindl, G. K. Pang, J. Miao, R. K. Zheng, H. L. W. Chan, C. L. Choy, Y. Wang // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89. – P. 232906-1–2906-3.

8. Raman spectroscopy studies of Ce-doping effects on $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ thin films / S. Y. Wang, B. L. Cheng, C. Wang, S. Y. Dai, K. J. Jin, Y. L. Zhou, H. B. Lu, Z. H. Chen, G. Z. Yang // J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 99. – P. 013504-1–013504-6.

Воронов Сергей Александрович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной физики,
Киевский политехнический институт,
Национальный технический университет Украины
(03056, Украина, г. Киев, проспект Победы, 37)
E-mail: s.voronov@kpi.ua

Гордийко Наталия Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра прикладной физики,
Киевский политехнический институт,
Национальный технический университет Украины
(03056, Украина, г. Киев, проспект Победы, 37)
E-mail: nataly-gor2@yandex.ua

Богорош Александр Терентьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра прикладной физики,
Киевский политехнический институт,
Национальный технический университет Украины
(03056, Украина, г. Киев, проспект Победы, 37)
E-mail: bogorosh@mail.ru

Шайко-Шайковский Александр Геннадиевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра профессионального и технологического
образования и общей физики,
Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича
(58012, Украина, г. Черновцы, ул. Коцюбинского, 2)
E-mail: shayko@bk.ru

Аннотация. Получены и изучены сегнетоэлектрические (СЭ) пленки $PbTiO_3$, нанесенные на диски из монокристаллического кремния Si (100). Рентгенографические и электронно-микроскопические исследования показали, что исследуемые пленки характеризуются ограниченной текстурой со структурой перовскита. Продемонстрирована возможность использования полученных пленок как регистрирующих сред энергонезависимых перезаписывающих носителей информации.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические, монокристаллические пленки, память, носители информации.

Voronov Sergey Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of applied physics,
Kiev Polytechnic Institute,
National Technical University of Ukraine
(03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Gordiyko Nataliya Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of applied physics,
Kiev Polytechnic Institute,
National Technical University of Ukraine
(03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Bogorosh Aleksandr Terent'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of applied physics,
Kiev Polytechnic Institute,
National Technical University of Ukraine
(03056, 37 Pobedy avenue, Kiev, Ukraine)

Shayko-Shaykovskiy Aleksandr Gennadievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of professional and technological
education and general physics,
Chernovitsky National University
named after Yuriy Fed'kovich
(58012, 2 Kotsyubinskiy street, Chernovtsy, Ukraine)

Abstract. Obtained and studied ferroelectric (FE) $PbTiO_3$ film , inflicted on the wheels of the single-crystal silicon Si (100) . X-ray diffraction and electron microscopy studies have shown that the investigated films are characterized by a limited texture with a perovskite structure . The possibility of using the obtained film as a non-volatile recording media overwrite media.

Key words: ferroelectric , single-crystal film , memory, storage media.

УДК 621.315.61

Воронов, С. А.

Исследование качества и надежности тонких пленок сегнетоэлектриков на кремниевой подкладке / С. А. Воронов, Н. А. Гордийко, А. Т. Богорош, А. Г. Шайко-Шайковский // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 60–66. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-9.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬЮ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

А. А. Адамова, А. П. Адамов, Г. Х. Ирзаев

Введение

Эффективный вывод современных изделий электронной техники на рынок напрямую связан с их технологичностью, которая должна обеспечиваться с самых ранних стадий конструкторско-технологического проектирования и производства. Для нормирования технологичности и ее формирования в процессе разработки изделий электронной техники установлена система оценок технологического качества (ТК) изделий. Под оценкой ТК изделия понимают комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих последовательное выявление технологичности отдельных составных элементов изделия в целом на основе сопоставления выявленных свойств данного изделия со свойствами изделия-аналога, которое принято в качестве базы сравнения, и представление результатов сопоставления в форме, приемлемой и, по мнению специалистов, оптимальной для принятия управленческих решений по совершенствованию анализируемой конструкции разрабатываемого изделия и технологии его изготовления [1, 2]. Достоверные и своевременные оценки ТК изделий занимают важное место в комплексной системе обеспечения их технологичности, так как влияют непосредственно на эффективность обработки изделий на технологичность.

В рамках данной работы проведен анализ подходов к технологической подготовке производства и классификация методов оценки технологичности промышленности изделий на два больших класса: качественные (дифференциальные) и количественные (интегральные) [3].

Качественная оценка позволяет установить соответствие принимаемых конструктивных решений при проектировании изделия в целом и его составных частей к требованиям, направленным на улучшение технологических процессов изготовления, эффективной эксплуатации, технического обслуживания и ремонта [4]. При проектировании деталей, сборочных единиц, функциональных узлов изделий в целом конструктор часто сталкивается с задачей выбора наиболее рационального технического и экономического решения из ряда технически возможных альтернатив без количественных расчетов. Решение этой задачи должно проводиться с применением качественных критериев путем оценки их соответствия требованиям технологических процессов механообработки, сборки, монтажа, регулировки и базируется на интуиции и профессиональном опыте специалистов. При проведении такого качественного анализа большое значение имеют и практический опыт, и интуиция конструктора, и его знания по методам прогрессивной технологии (обработка, сборка, контроль и испытания), а также основных требований структуры и содержания этих методов.

Однако не всегда можно и нужно полагаться только на субъективный эмпирический подход. Технологические требования, предъявляемые к тем или иным процессам изготовления анализируемого изделия, должны формулироваться специалистами-технологами с обобщением коллективного опыта на основе соответствующей нормативно-технической и справочной документации (ГОСТ, ОСТ, руководящие материалы и др.). Эти документы, безусловно, подлежат периодическому пересмотру и уточнению по мере развития теории и накопления опыта, а решения, принимаемые конструктором, должны соответствовать технологическим требованиям и рекомендациям.

При проведении качественной оценки ТК необходимо учитывать тип и вид изделия и процессы его изготовления, а также требования нормативно-технической документации с учетом следующих факторов:

- технологичность конструкций по процессам их изготовления с общими требованиями к выбору материалов, заготовок, термической обработке, сварке, деталям, изготавливаемым из неметаллов, защитным покрытиям, сборке и т.д.;
- особенности производственной программы, вид изделия, его структурные составляющие, новизну и перспективность спроса, объемы выпуска;
- производственные факторы предприятий-изготовителей, производственно-технологическую структуру предприятия, применение новых высокопроизводительных методов и процессов изготовления.

Однако остается нерешенной проблема согласования методов дифференциального и интегрального анализов технологичности. Так, ГОСТ 14.202-73 и отраслевые стандарты рекомендуют использовать качественную оценку, характеризующую ТК «...обобщенно на основании опыта исполнителя», перед основной количественной оценкой. Для качественной оценки рекомендуется использовать по-прежнему критерии типа «хорошо – плохо», «допустимо – недопустимо», «технологично – не технологично». Однако такая качественная оценка, являясь субъективной, не позволяет получить требующийся эффект от предлагаемых изменений или замены одного варианта конструкции другим, хотя именно он должен являться определяющим при выборе оптимальных решений.

Несмотря на субъективный характер результатов, качественный метод оценки технологичности до сих пор используется на практике из-за сравнительно незначительных затрат на проведение оценки, но тем не менее почти всегда в сочетании с количественной оценкой ТК изделия. Для снижения субъективности и повышения достоверности метода предлагается выражать конструктивно-технологические признаки изделия в виде качественных факторов с переводом интенсивности этих факторов в комплексную количественную оценку технологичности. При этом рекомендуется использовать метод измеряемых экспертных оценок с привлечением к экспертизе опытных специалистов разработчиков и изготовителей, знакомых с особенностями оцениваемого изделия и условиями его производства (например, использования контрольных карт).

Однако выбор наиболее технологичного варианта изделия, исключающего элемент субъективизма и позволяющего оптимизировать параметры технологичности, должен обеспечиваться на основании системного анализа, сопоставления результатов количественной оценки свойств конструкции [5, 6]. Количественные оценки являются контрольной проверкой ранее проведенных качественных оценок и принимаемых на их основе технических решений.

Анализ комплексной методики количественной (интегральной) оценки технологичности

Впервые предложенная и обоснованная идея Н. А. Бородачева о количественной оценке ТК изделий позднее была развита и регламентирована в виде стандартов и методик ЕСТПП по системе количественных оценок ТК, охватывающей всю совокупность свойств изделий любого вида и позволившей определять экономическую целесообразность новой конструкции на всех стадиях ее жизненного цикла [7, 8].

Эта система включает:

- базовые показатели ТК представителя группы изделий, обладающих общими конструктивно-технологическими признаками;
- показатели технологичности, достигнутые при разработке изделия;
- показатели уровня технологичности разрабатываемого изделия, равные отношению достигнутых показателей к базовым. Схема количественной оценки ТК изделий представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема количественной оценки технологичности изделия приборостроения

В процессе проектирования для количественной оценки изделия используют разнообразные показатели технологичности. Это многообразие обусловлено многообразием свойств современных промышленных изделий. Как известно, в зависимости от области проявления технологичности конструкции различают показатели производственной, эксплуатационной, ремонтной технологичности. По числу характеризующих свойств показатели делятся на частные, групповые и комплексные [9, 10].

Частные показатели удобно использовать в тех случаях, когда явно выделяются отдельные свойства конструкции, подлежащие изучению, измерению (оценке), с точки зрения оказываемого ими воздействия на общий уровень технологичности изделия. Например, оценка возможной параллельной сборки нескольких сборочных единиц в изделие в виде частного коэффициента параллельности сборки позволяет рассчитать величину экономии затрат труда на оптимизацию сборочных работ.

Групповые показатели характеризуют группу родственных свойств, «входящих» в технологичность конструкции изделия. Групповыми можно считать показатели материалоемкости, куда входят частные показатели (сухая масса, коэффициент использования материала, коэффициент применяемости материала и др.), выражающие единый вид затрат материальных ресурсов.

Комплексные показатели технологичности характеризуют совокупность однородных свойств, рассматриваемых в различных областях проявления технологичности, либо совокупность разнородных свойств, рассматриваемых в одной области проявления технологичности конструкции.

В зависимости от стадии определения показатели технологичности можно также классифицировать на **прогнозные, базовые и текущие**. Первые используются для прогнозирования предстоящих затрат на более ранних стадиях проектирования изделия, при необходимости учета перспектив развития технологии, техники, организации производства, т.е. для предсказания отдельных частных свойств его технологичности.

Базовые показатели используются для установления исходных требований к технологичности изделий, управления процессом проектирования на всех его стадиях и итоговой оценки достигнутого уровня технологичности на конкретный период, т.е. уровень качества всех конструкторско-технологических решений. На примере аналогов базовые показатели признаются обобщающими для конкретного вида техники и условий производства.

Все многообразие известных показателей ТК промышленных изделий может быть сведено к пяти важнейшим группам показателей:

- трудоемкость изделия (относительный уровень трудоемкости);
- себестоимость изделия (относительный уровень себестоимости);
- материалоемкость (элементоемкость) изделия;
- применяемость унифицированных и стандартизированных решений;
- повторяемость конструктивных решений.

В настоящее время одной из актуальных проблем в науке и технике по-прежнему является разработка и развитие научно обоснованных методов измерения и оценки ТК изделий. Достоверность определения их параметров для использования при управлении процессами разработки изделий, обеспечивающих наибольшую достоверность определения их параметров для использования при управлении процессами разработки изделий. При этом необходимо постоянно учитывать взаимосвязи и взаимообусловленность разнообразных частных свойств, из которых складываются отдельные группы более сложных родственных свойств, крупные совокупности этих групп (комплексы свойств) и в конечном итоге – интегральное качество всего изделия в целом.

Формализация и автоматизация анализа технологичности

Рассматривая проблему автоматизации оценки технологичности изделий электронной техники, в первую очередь следует выделить задачи формализации показателей технологичности и задачу формализации процедур расчета.

Решение **первой задачи** формализации показателей технологичности усложняется разнообразием используемых в практике систем показателей технологичности, что обусловлено необходимостью достижения наибольшей объективности и достоверности оценки для целенаправленного совершенствования конструкторско-технологических решений при ТПП и в серийном

производстве изделий. Однако отсутствие четких критериев отбора показателей, неполный учет исходных данных и действующих в производственной среде факторов, вариация информационной емкости показателей в зависимости от вида изделия и стадии проектирования способствуют возникновению серьезных проблем у специалистов как при выборе оптимальных систем показателей технологичности изделий, так и при получении современных и объективных оценок ТК. Вопросы использования различных схем для выбора системы показателей сегодня слабо исследованы и требуют существенных уточнений в различных отраслях промышленности.

Правильный выбор основных и дополнительных показателей технологичности является одним из принципиальных вопросов создания системы управления ТК. Однако если по выбору основных показателей ТК имеются четкие методические указания (в качестве основных стандартами и существующими методиками предлагаются показатели трудоемкости изготовления как меры затрат живого труда и технологической себестоимости как меры затрат живого и прошлого труда при изготовлении изделия), то в выборе дополнительных показателей ТК нет конкретных и даже общих рекомендаций. Это обусловлено тем, что различные изделия в зависимости от их особенностей могут характеризоваться варьируемым множеством свойств. Вместе с тем очевидна актуальность этой проблемы, которая состоит в том, чтобы не только обеспечить единый методический подход к выбору дополнительных показателей ТК, но и разработать обоснованные практические рекомендации в пределах каждой отрасли.

Задача выбора дополнительных показателей ТК – это, по существу, также является серьезной задачей по определению их значимости, удельного веса в формировании значения комплексного показателя, т.е. оценка экономической эквивалентности.

Вторая задача количественных оценок ТК промышленных изделий состоит в необходимости автоматизации процедур расчета. Она является особенно острой для серийных предприятий промышленности, методология жизнеобеспечения и управления которыми опирается на современные информационные технологии (ИТ) производственных систем. Она представляет собой совокупность процессов и средств обработки информации в реальном масштабе времени. В последнее время для формализации и иерархической декомпозиции при модульной и комплексной оценке технологичности все шире используются визуальные методы системного анализа [11–13].

Предприятия-производители наукоемких изделий развиваются в направлении полного перехода на информационные технологии проектирования, производства, реализации, эксплуатации и утилизации продукции – CALS-технологии информационной поддержки жизненного цикла изделий [14–16].

Обеспечение конкурентоспособности предприятия в настоящее время невозможно без внедрения технологии **интегрированной** совместной работы над изделием, которая обеспечивает создание среды параллельной разработки изделия (синхронных технологий), создание структурированного электронного описания изделия, управление конфигурацией на всех этапах жизненного цикла изделия (проектирование, технологическая подготовка производства, серийное производство, производственное сопровождение), сокращение времени и снижение затрат конструкторско-технологического проектирования и согласования технической документации за счет поддержки электронного документооборота. Эти процессы только начинают внедряться в производство и основой их является безбумажное кодовое представление информационной модели изделия как электронного макета. Разработка национальных стандартов для этих целей создает базу для организации единого информационного пространства предприятия.

В этих условиях на предприятии должна создаваться комплексная автоматизированная информационная система, в которой предусматриваются хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте. Применение комплексных автоматизированных систем на предприятиях позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описание многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранится в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю. Задача комплексной автоматизации производства довольно сложная, многоплановая, трудоемкая, а потому требует серьезных исследований, методических проработок, и ее целесообразно решать по отдельным подсистемам.

Функциональная структура проектно-производственной подсистемы, формирующая содержательное описание целевой функции информационной модели предприятия-изготовителя и реализуемая в единой информационной среде, может быть представлена в виде, показанном на рис. 2.

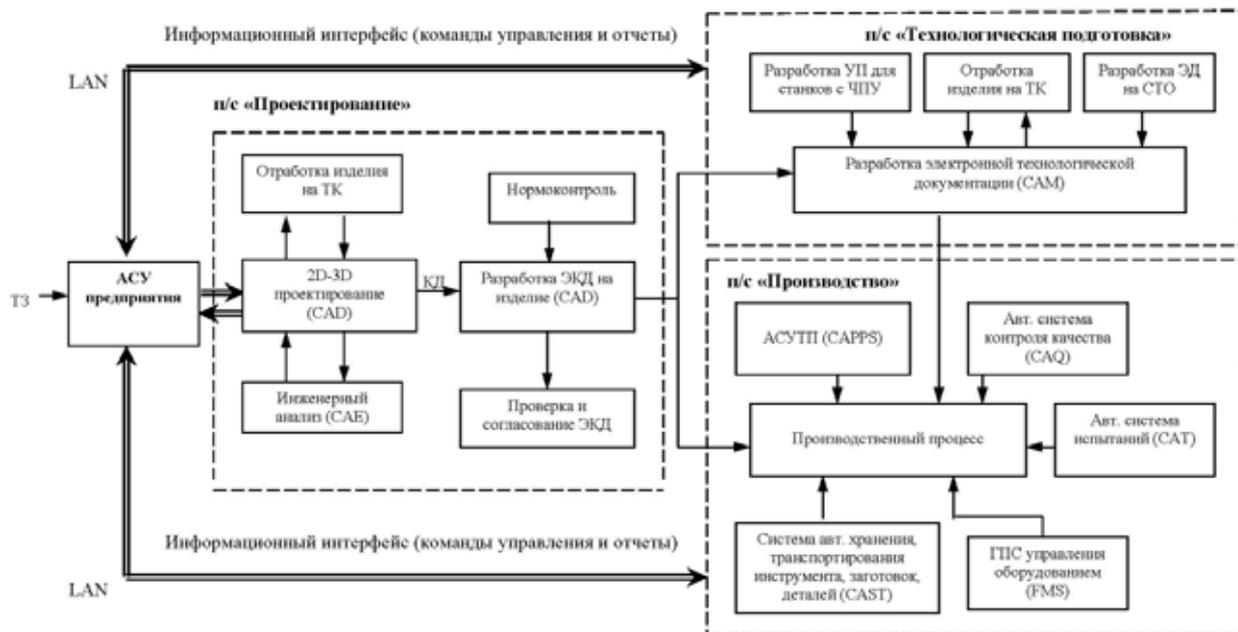


Рис. 2. Схема интеграции показателей технологичности на основных стадиях жизненного цикла изделий электронной техники: ЭКД – электронная конструкторская документация; ТЗ – техническое задание; УП – управляющая программа; ЧПУ – числовое программное управление; ГПС – гибкие производственные системы; АСУТП – автоматизированная система управления технологическими процессами; СТО – средства технологического оснащения

Рассмотрим некоторые особенности информационных технологий, используемых на различных стадиях жизненного цикла промышленных изделий и затрагивающих вопросы обработки изделий на технологичность конструкций.

Если раньше САПР (CAD) являлись инструментом, повышающим качество и скорость проектирования, то сегодня это незаменимое звено в проектировании и производстве промышленных изделий. Сегодня наибольший эффект дает использование интеллектуальных САПР с интегрированными ресурсами, реализующими сквозной цикл проектирования, позволяющих проектировать изделия, начиная с создания принципиальной схемы до получения конструкторской документации или создания управляющих программ для технологического оборудования [17, 18].

CAD в условиях современных синхронных технологий должна удовлетворять следующим требованиям:

- поддержка системы сквозного проектирования в реальном времени и в рамках единого проекта с выдачей комплекта конструкторской документации (КД) в соответствии с требованиями ЕСКД;
- обеспечение интеграции между пакетами прикладных программ внутри системы и возможность «экспорта/импорта» данных с другими системами;
- контроль над целостностью проекта;
- возможность интеграции с импортными и отечественными базами данных элементов функциональных узлов;
- наличие удобного графического представления проектных данных;
- полный контроль над процессом проектирования и управления проектами.

CAD/CAM/CAE системы являются одним из важнейших инструментов в силу важности их функционального назначения и массовости использования. Однако не любые CAD/CAM/CAE системы эффективны в качестве основных компонентов корпоративной информационной системы. При их выборе нужно учитывать как особенности предприятия, так и соответствие внедряемых систем мировым тенденциям развития.

Проведенный анализ современных CFAD/CAM/CAE систем показывает, что в них по-прежнему автоматизированы только численные и в большей степени расчетные процедуры.

Автоматизированная поддержка профессионального творчества, задач поискового конструирования, качественного анализа и прогнозирования еще слабо представлена в инструментах

CALS-технологий. Задачи, возникающие на ранних стадиях проектирования технических объектов (формирование технического задания, разработка технического предложения, эскизное проектирование), решаются в интерактивном режиме инженером-проектировщиком. Реализуемые при этом процедуры связаны с решением слабоструктурированных и трудно формализуемых задач, характеризующихся наличием неполной и нечеткой информации как о создаваемой технической системе, так и о методах ее синтеза, и поэтому с трудом поддаются автоматизации в рамках существующей методологии автоматизированного проектирования [19–21].

Однако, к сожалению, задачи оценки и прогнозирования технологичности создаваемых новых изделий не выделены в самостоятельные подсистемы, а реализуются в виде количественных расчетов при их комплексном математическом моделировании [22].

Укрупненно можно выделить следующий состав задач технологического проектирования, требующих автоматизированного решения на различных этапах жизненного цикла промышленных изделий.

На этапе технического предложения и эскизного проекта:

- технологический анализ отечественных и зарубежных аналогов изделий для определения возможности заимствования конструкторско-технологических решений, применения новых материалов и технологий, возможности технологической реализации новых решений и структурно-технологической преемственности;

- предварительный расчет показателей производственной технологичности, формирование возможного перечня оборудования и специальной оснастки для реализации выбранных начальных конструкторско-технологических решений;

- выбор схем применения материалов, комплектующих, конструктивно-технологического членения изделий, конструктивно-технологического исполнения стыков, разъемов и других основных видов соединений;

- формирование возможных схем сборки, базирования, увязки оснастки, оценка возможности применения высокопроизводительного автоматизированного оборудования;

- разработка ориентировочного проектного графика создания изделия, схем возможной производственной кооперации.

Исходными данными являются при этом разработанные на этих этапах варианты структурной модели конструкции изделия, в том числе и аналогов.

На этапах технического, рабочего проекта и подготовки производства:

- уточнение принятых ранее схем конструктивно-технологического членения, сборки, монтажа, увязки сборочной и контрольной технологической оснастки;

- технологический анализ электронной КД, отработка электронных макетов деталей, сборочных единиц на технологичность;

- разработка директивных технологических процессов на узловую и агрегатную сборку, регулировку и испытание изделий;

- изготовление элементов конструкции из новых материалов, изготовление типовых и оригинальных деталей;

- разработка маршрутных техпроцессов, уточнение состава, характеристик затрат на проектирование и изготовление средств технологического оснащения (в том числе сборочных приспособлений, контрольно-испытательных стендов);

- передача заводу-изготовителю полного комплекса электронной КД (обеспечение доступа через сеть).

При постановке изделия на производство:

- доработка конструкции изделия с учетом обоснованных требований завода-изготовителя, схемы кооперации и участием ведущих специалистов завода-изготовителя, а также разработчика по результатам государственных контрольных испытаний и предложением заказчика;

- приемка КД заводом-изготовителем;

- автоматизированное проектирование рабочих технологических процессов изготовления и сборки изделия, а также проектирование средств технологического оснащения.

На этапе опытного производства и выпуска установочной серии:

- корректирование КД, а также технологических процессов при внесении соответствующих изменений в документацию и контроль за их проведением;

- возможные корректировки в технологических планировках, маршрутах и оборудовании;

– формирование комплекса сопроводительной технологической документации;
– передача данных в подсистемы управления производством и логистической поддержки для решения задач планирования, управления и материально-технического обеспечения.

Отработка на технологичность конструкций изделий связана с проведением трудоемких расчетных работ по определению численных значений показателей и обработкой больших информационных массивов. Особенно она усложняется, когда изделие является многофункциональным, сложным по структуре и обладает большим многообразием применяемых марок материалов, комплектующих и типоразмеров составных частей. В более широком плане отработка конструкции на технологичность должна включить и вопросы группирования деталей и сборочных единиц, отнесения их к типовым или групповым технологическим процессам, выбор рациональных технологий сборки, монтажа, контроля и регулировки, наиболее полного и рационального использования оборудования и технологической оснастки. Решение всех этих вопросов должно быть комплексным с учетом взаимной увязки и иерархической подчиненности, что обеспечивают современные методы визуального проектирования [12, 19, 20]. Конечно, при таком подходе значительно увеличиваются объемы обрабатываемой информации. Качественное проведение таких работ невозможно без применения вычислительной техники. Автоматизированная подсистема количественной оценки ТК изделий и управления ее отработкой должна быть составной частью комплексной системы обеспечения и управления качеством выпускаемых на предприятии изделий [5, 6, 22].

Заключение

При реализации комплексных систем интегрированной информационной среды конструкторско-технологического проектирования в условиях синхронных технологий увеличивается значимость автоматизированного расчета показателей ТК изделий, оценки комплексного показателя технологичности. Нерешенным остается ряд проблем, среди которых научно обоснованный выбор изделия-аналога для определения базовых показателей технологичности изделий в автоматизированном режиме с использованием информационных баз по классам изделий; многокритериальная оптимизация выбора состава дополнительных показателей технологичности, зависящего от типа производства, вида изделия, условий изготовителя и других факторов; автоматизированная оценка весовых коэффициентов показателей технологичности объектов с выделением существенных входных и наиболее информативных весовых переменных.

Предложенные комплексные методологические принципы обеспечивают формализацию и автоматизацию ТК на всех этапах жизненного цикла современных промышленных изделий, в том числе с учетом возможностей интеллектуальных информационных технологий.

Список литературы

1. Адамов, А. П. Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств: модели, алгоритмы, программные комплексы, механизмы реализации, прогнозирование / А. П. Адамов, Г. Х. Ирмаев, А. А. Адамова. – СПб. : Политехника, 2008. – 312 с.
2. Гришко, А. К. Методология управления качеством сложных систем / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 377–379.
3. Адамова, А. А. Методика оценки технологичности электронных изделий на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов, В. А. Шахнов // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 352–356.
4. Адамов, А. П. Дифференциальные коэффициенты оценки технологичности электронных средств и их применение при структурно-функциональном моделировании производственных систем / А. П. Адамов, А. А. Адамова, А. И. Власов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2015. – № 5 (104). – С. 109–123.
5. 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.
6. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Д. В. Артамонов, В. А. Канайкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 77–84.

7. Ирзаев, Г. Х. Автоматизация процесса формирования системы показателей для оценки технологичности конструкции изделия / Г. Х. Ирзаев, А. А. Адамова // Автоматизация. Современные технологии. – 2014. – № 11. – С. 27–33.
8. Камышная, Э. Н. Методика расчета технологичности конструкций электронной аппаратуры / Э. Н. Камышная, В. В. Маркелов, В. А. Соловьев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2003. – № 1. – С. 116–125.
9. Адамова, А. А. Многоуровневая модель формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства / А. А. Адамова, А. П. Адамов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 11 (23). – С. 12–13.
10. Адамов, А. П. К проблеме автоматизированной количественной оценки технологичности современных электронных средств / А. П. Адамов, Г. Х. Ирзаев, А. А. Адамова // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 19–22.
11. Власов, А. И. Визуальные модели управления качеством на предприятиях электроники / А. И. Власов, А. М. Иванов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 11. – С. 34–35.
12. Власов, А.И. Пространственная модель оценки эволюции методов визуального проектирования сложных систем / А. И. Власов // Датчики и системы. – 2013. – № 9 (172). – С. 10–28.
13. Адамова, А. А. Визуальное моделирование адаптации подготовки производства к выпуску новой продукции / А. А. Адамова, А. И. Власов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2014. – № 2 (154). – С. 46–56.
14. Власов, А. И. Информационно-управляющие системы для производителей электроники / А. И. Власов, А. Е. Михненко // Производство электроники. – 2006. – № 3. – С. 15–21.
15. Власов, А. И. Принципы построения и развертывания информационной системы предприятия электронной отрасли / А. И. Власов, А. Е. Михненко // Производство электроники. – 2006. – № 4. – С. 5–12.
16. Тимошкин, А. Г. О стратегии и тактике маркетинговой политики многопрофильной компьютерной фирмы / А. Г. Тимошкин, А. И. Власов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 1996. – № 9. – С. 59–61.
17. Применение методов искусственного интеллекта в САПР технологических процессов производства электронной аппаратуры / В. П. Григорьев, Э. Н. Камышная, Ю. И. Нестеров, С. А. Никитин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 48 с.
18. Дембицкий, Н. Л. Применение методов искусственного интеллекта в проектировании и производстве радиотехнических устройств / Н. Л. Дембицкий, А. В. Назаров. – М., 2009. – 228 с. – (Научная библиотека МАИ).
19. Методы генерационного визуального синтеза технических решений в области микро- /наносистем / А. И. Власов, Л. В. Журавлева, Г. Г. Тимофеев // Научное обозрение. – 2013. – № 1. – С. 107–111.
20. Журавлева, Л. В. Визуализация творческих стратегий с использованием ментальных карт / Л. В. Журавлева, А. И. Власов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 1 (21). – С. 133–140.
21. Власов, А. И. Применение методов визуального моделирования для формализации конструкторско-технологической информации / А. И. Власов // Информатизация образования – 2012 : материалы Международ. науч.-практ. конф. – Орел : Орлов. гос. ун-т им. И. С. Тургенева, 2012. – С. 70–78.
22. Системный анализ в управлении предпринимательскими организациями / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. А. Сенькина, И. Т. Исмаилова. – СПб. : Политехника, 2002. – 251 с.

Адамова Арина Александровна

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., 5, стр. 1)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный технический
университет
(367006, Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Пирамидальная, д. 49)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Adamova Arina Aleksandrovna

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

Adamov Aleksandr Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(367006, 49 Piramidal'naya street, Mahachkala,
Dagestan, Russia)

Ирзаев Гамид Хайбулаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и прикладной информатики,
Дагестанский государственный технический университет
(367006, Россия, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Пирамидальная, д. 49)
E-mail: irzajev@mail.ru

Аннотация. Представлены стадии конструкторско-технологического проектирования и производства. Проведен анализ комплексной методики количественной (интегральной) оценки технологичности. Разработана схема количественной оценки технологичности изделий приборостроения. Под оценкой ТК изделия понимают комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих последовательное выявление технологичности отдельных составных элементов изделия в целом на основе сопоставления выявленных свойств данного изделия со свойствами изделия-аналога, которое принято в качестве базы сравнения, и представление результатов сопоставления в форме приемлемой и, по мнению специалистов, оптимальной для принятия управленческих решений по совершенствованию анализируемой конструкции разрабатываемого изделия и технологии его изготовления. Представлена схема интеграции показателей технологичности на основных стадиях жизненного цикла электронной техники.

Ключевые слова: технологичность, электронная аппаратура, технологическая подготовка производства.

УДК 004.75

Адамова, А. А.

Анализ проблем автоматизации управления технологичностью изделий электроники в условиях глобального обеспечения качества / А. А. Адамова, А. П. Адамов, Г. Х. Ирзаев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 67–75. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-10.

Irzaev Gamid Khaybulaevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technologies
and applied informatics,
Dagestan State Technical University
(367006, 49 Piramidal'naya street, Mahachkala,
Dagestan, Russia)

Abstract. The article presents the stages of engineering and design and production. The analysis of the complex techniques of quantitative (integral) evaluation of adaptability. Developed a scheme for the quantitative evaluation of manufacturability of products of instrumentation. Under evaluation of TC products understand the complex of interrelated measures, including the consistent identification of adaptability of the individual constituent elements of the product as a whole based on matching the identified properties of this product with the properties of products-analogue, which is taken as a base of comparison, and presentation of the results of the comparison in a form acceptable and, according to experts, the best for making management decisions to improve the analyzed structure of the developed product and technology of its manufacture. A scheme of the integration of indicators of technological at key stages of the life cycle of electronic equipment.

Key words: technology, electronic instrumentation, technological preparation of production.

ВЛИЯНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ТРЕНАЖЕРОВ НА ПЛАНИРОВАНИЕ ТРЕНАЖНОЙ ПОДГОТОВКИ

Б. Ж. Куатов, Б. К. Кемалов, Р. Р. Бикеев

Использование в тренажеростроении имитационных моделей с ограниченной адекватностью является одной из основных причин возникновения неадекватности применения тренажеров, заключающейся в некорректном формировании учебных планов тренажной подготовки (ТП), а именно: в определении количества тренировок на технических средствах обучения (ТСО) [1]. Из-за ограниченной адекватности тренажеров наблюдаются взаимозависимые события:

- приобретение летным составом неверных навыков по эффективным способам и тактическим приемам применения летательных аппаратов (ЛА) и его систем;
- искаженное оценивание обрабатываемых летным составом учебных упражнений и задач.

Искаженное оценивание обрабатываемых учебно-тренировочных задач (УТЗ) происходит из-за существующего несоответствия между оценками обученности летного состава на тренажерах и штатной технике (ШТ) по единым упражнениям. Причиной неадекватности обученности $\mathfrak{X}(K)$ на средствах тренажа является наличие неучтенных навыков, которые порой оказываются вредными, хотя и воспринимаются как нужные.

Из теории психологии и педагогики [2] известно, что навыки – это умение выполнять целенаправленные действия, доведенное до автоматизма в результате сознательного многократного повторения одних и тех же движений или решения типовых задач. Применительно к ТП сознательное многократное повторение одних и тех же движений или решение типовых задач осуществляется в процессе тренировок. Однако также известно, что действия можно классифицировать как правильные (положительные) и неправильные (отрицательные, ошибочные) [3].

При этом под положительными и отрицательными действиями понимают такие действия оператора, которые обеспечивают соответственно положительный (повышение функции полезности) и отрицательный (снижение функции полезности) эффекты применения технических средств.

В связи с этим целесообразно ввести понятие «навыки» согласно классификации действий:

- положительные навыки C – это доведенные во время тренировок до автоматизма положительные действия;
- отрицательные навыки E – это доведенные во время тренировок до автоматизма отрицательные действия.

С учетом этого неадекватность обученности $\mathfrak{X}(K)$ заключается в наличии ошибок идентификации навыков, так как часть положительных навыков C воспринимается как отрицательные E , и наоборот, часть отрицательных навыков E – как положительные C .

Для формализации возможных ошибок целесообразно ввести следующие понятия:

- ложные действия (ошибка первого рода) – это действия, которые идентифицируются как положительные, хотя на самом деле они отрицательные;
- пропущенные положительные действия (ошибка второго рода) – это действия, которые идентифицируются как отрицательные, хотя на самом деле они положительные.

Согласно приведенной классификации ошибок идентификации действий, которые, безусловно, преобразуются при доведении действий до автоматизма в ошибки идентификации навыков, используем определения ошибочных навыков:

- ложные навыки F – это доведенные во время тренировок до автоматизма отрицательные действия, которые идентифицируются как положительные;
- пропущенные положительные навыки D – это доведенные во время тренировок до автоматизма положительные действия, которые идентифицируются как отрицательные.

С учетом вышеизложенного на рис. 1 представлена обобщенная классификация возможных навыков, приобретаемых летным составом на средствах тренажа в процессе тренажной подготовки.

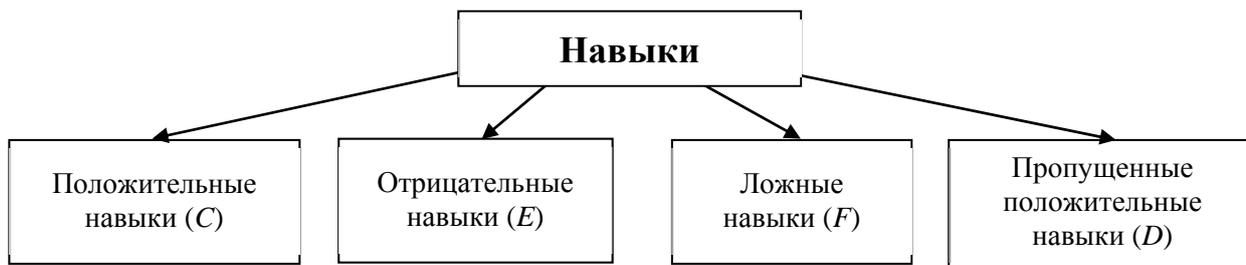


Рис. 1. Классификация навыков

Приведенная обобщенная классификация навыков образует полную группу событий. Введение обобщенной классификации навыков позволяет конкретизировать факторы существования неадекватности обученности $\mathfrak{R}(K)$, которые представлены на рис. 2.



Рис. 2. Факторы существования неадекватности обученности

Очевидным является то, что если первые три фактора, присущие как для тренажеров, так и для ШТ, в силу их однородности происхождения при оценке уровня навыков могут быть скомпенсированы (они не влияют на расхождение оценок навыков, приобретаемых на тренажерах и реальной технике при выполнении условия их идентичности), то последний проявляется только на тренажерах и не может быть скомпенсирован, как три первые.

Необходимо отметить, что ложные F и пропущенные правильные D навыки выступают объективной реальностью независимо от отсутствия возможности их наблюдаемости и являются следствием ограниченной адекватности тренажеров.

В связи с тем, что в настоящее время существуют проблемы организации ТП, поэтому независимо от принятых представлений по планированию полетных заданий реальной объективностью является конфликт применения ЛА, сущность которого состоит в наличии противоречий между прогнозируемым и действительно необходимым количеством сил и средств, обеспечивающих гарантированную эффективность.

Известно, что с помощью любого тренажера может быть достигнут лишь вполне определенный максимально возможный уровень подготовленности. Он ограничивается адекватностью имитационного моделирования к процессам, происходящим во время применения ЛА и его систем [4].

Обобщая понятие вероятности адекватности тренажера, имеем, что она характеризует не что иное, как вероятность того, что операторы не будут чувствительны к различию между выходными информационными параметрами тренажера и ШТ при одинаковых воздействиях на их органы управления, и это не приведет к выполнению операторами на тренажере действий, отличных от действий на реальной технике, которые для последней являются положительными, т.е. величина γ вероятности адекватности тренажера определяет потенциальный уровень положительных навыков, приобретаемых операторами на тренажерах. Очевидным является, что для ШТ $\gamma = 1$.

Вероятностный показатель уровня приобретения положительных навыков (обученности) операторов определяется как

$$\omega_C = \gamma\omega, \quad (1)$$

где ω – оценка уровня навыков, определяемая из анализа действий операторов

$$\omega = \frac{N_c}{N} = 1 - \frac{N_e}{N},$$

здесь N_c и N_e – количество правильных и ошибочных действий соответственно; N – общее количество действий.

Истинные оценки уровня других навыков, приобретаемых на тренажере, определяются как

$$\omega_E = \gamma(1 - \omega); \quad (2)$$

$$\omega_F = (1 - \gamma)\omega; \quad (3)$$

$$\omega_D = (1 - \gamma)(1 - \omega), \quad (4)$$

где ω_E , ω_F и ω_D – оценки уровней навыков E , F и D соответственно.

Причем необходимо отметить, что представленные оценки уровней навыков (1)–(4) составляют полную группу событий, так как

$$\omega_C + \omega_E + \omega_F + \omega_D = 1. \quad (5)$$

Очевидно, что для ШТ: $\omega_C = \omega$, $\omega_E = 1 - \omega$, $\omega_F = 0$, $\omega_D = 0$, следовательно, $\omega_C + \omega_E + \omega_F + \omega_D = 1$, это подтверждает справедливость оценок уровней (1)–(4).

В свою очередь уровень навыков, приобретаемых за N тренировок на ШТ, определяется по (1), следовательно, для оценки уровней C и E имеем

$$\omega_C(N) = 1 - (1 - \omega_0)(1 - \xi)^N; \quad (6)$$

$$\omega_E(N) = (1 - \omega_0)(1 - \xi)^N. \quad (7)$$

Из-за частичного или полного отсутствия имитации некоторых процессов и эффектов в тренажере, являющихся по сути отвлекающими и рассеивающими внимание оператора, возможна такая ситуация, когда доля навыков ξ_S , приобретаемая на тренажере, может оказаться несколько выше, чем доля навыков ξ , приобретаемая на ШТ. Поэтому оценка уровня навыков, приобретаемых на тренажере за n тренировок, имеет вид

$$\omega(n) = 1 - (1 - \omega_0)(1 - \xi_S)^n. \quad (8)$$

Подставив (8) в (1)–(4) и проведя некоторые преобразования с учетом того, что если оператор ранее не занимался на тренажере, то начальная оценка уровня F – $(1 - \gamma)\omega_0$, являющаяся следствием ее неадекватности, равна нулю, а начальная оценка уровня C – $\gamma\omega_0$ равна ω_0 , имеем

$$\omega_C(n) = \gamma - (\gamma - \omega_0)(1 - \xi_S)^n; \quad (9)$$

$$\omega_E(n) = (\gamma - \omega_0)(1 - \xi_S)^n; \quad (10)$$

$$\omega_F(n) = \bar{\gamma} - \bar{\gamma}(1 - \xi_S)^n; \quad (11)$$

$$\omega_D(n) = \bar{\gamma}(1 - \xi_S)^n, \quad (12)$$

где $\bar{\gamma} = 1 - \gamma$ – вероятность неадекватности тренажера.

На рис. 3 кривой ω^* % (пунктирная кривая) соответствует типовой график усвоения навыков (в процентах) от числа тренировки n , а кривой ω_C (сплошная кривая) – данные, полученные при ее аппроксимации при $\omega_0 = 0$, $\xi_S = 0,5$, $\gamma = 0,71$.

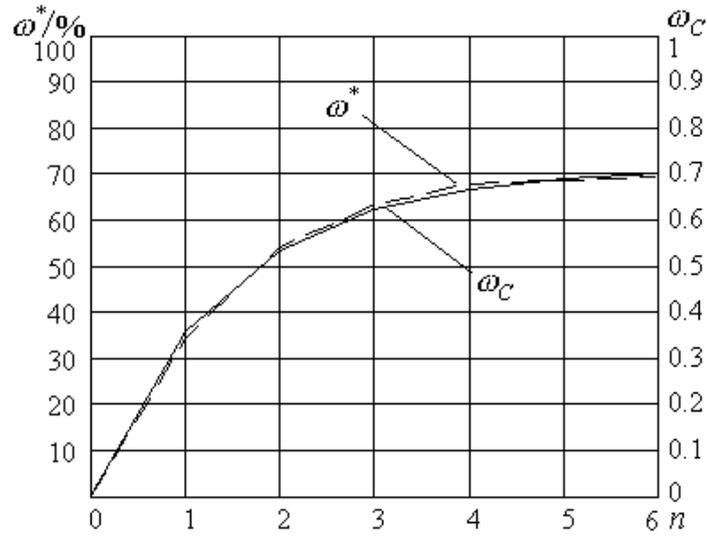


Рис. 3. Усвоение навыков от числа тренировок

На основании этого можно констатировать следующее: так как величина γ определяет потенциальный уровень правильных навыков, приобретаемых оператором на тренажере, а величина $(1-\gamma)$ определяет потенциальный уровень неправильных навыков, наличие которых свидетельствует о существовании неадекватности применения тренажеров, то последняя может быть использована в качестве индикатора сопутствующего признака неадекватности применения тренажеров.

На рис. 4 для исходных значений $\omega_0 = 0,25$, $\xi_S = 0,09$, $\gamma = 0,8$ представлены графические зависимости оценок уровней навыков, приобретаемых на тренажерах за n тренировок.

С учетом этого имеем, что после цикла занятий на тренажерах доля навыков ξ , усваиваемая за очередную тренировку на ШТ, будет направлена на приобретение новых, ранее неизвестных, и восстановление старых, ранее приобретенных, но забытых или пропущенных навыков (так как существуют E и D), а также на ликвидацию ложных навыков F .

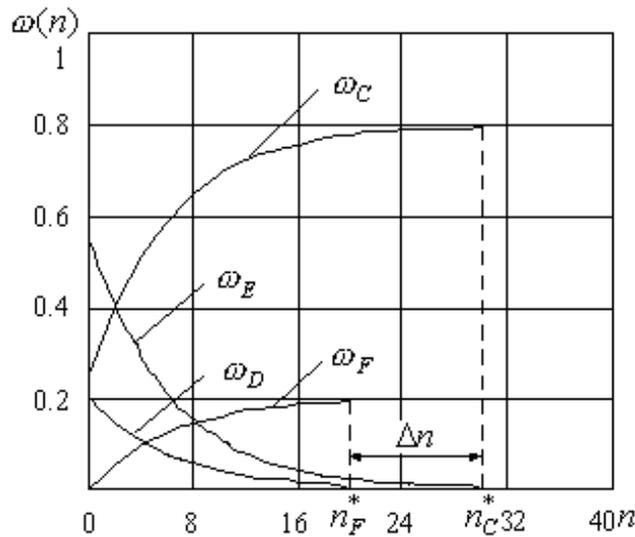


Рис. 4. Оценка уровня навыков, приобретенных на тренажерах

Основную опасность несут ложные навыки, которые при использовании тренажеров из-за их ограниченной адекватности существуют как объективная реальность независимо от возможности их осозаемого восприятия, а тем более селекции из смеси действительно наблюдаемых навыков. Ложные навыки вызывают ложное прогнозирование эффективности боевого применения ЛА,

которая может оказаться далекой от истинной эффективности, из-за чего планируемые мероприятия по выполнению боевых заданий могут быть несостоятельными [5].

На основании вышеизложенного имеем: адаптация содержательного компонента учебных планов для устранения неадекватности применения тренажеров должна быть направлена на выработку мер по компенсации ложных навыков [6].

Таким образом, чтобы устранить неадекватность применения тренажеров, необходимо производить как оценку уровня обученности операторов, так и оценку доли навыков, приобретаемых ими в процессе тренировок с учетом ограниченной адекватности тренажерных средств по отношению к ШТ и предписывающих ограничений на их использование. Разработанный метод адаптации содержательных компонентов учебных планов позволяет не только произвести расчет для каждого варианта учебного плана ТП, но и произвести выбор рационального варианта в соответствии с располагаемым бюджетом времени на ее проведение и допустимыми экономическими затратами.

Список литературы

1. Авиационные тренажеры модульной архитектуры / Э. В. Лапшин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина, Б. В. Клюев, Н. К. Юрков. – Пенза : Информ.-издат. центр ПГУ, 2005. – 146 с.
2. Пономаренко, В. А. Психология жизни и труда летчика / В. А. Пономаренко. – М. : Воениздат, 1992. – 224 с.
3. Концептуальная модель формирования летных навыков в процессе тренажерной подготовки / А. И. Годунов, Б. Ж. Куатов, Н. К. Юрков, С. Ж. Куртаев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (Национального исследовательского университета). – 2014. – № 4 (46). – С. 7–15.
4. Дикарев, В. А. Алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы планирования тренажерной подготовки операторов / В. А. Дикарев // Автоматика и вычислительная техника. – 2002. – № 2. – С. 71–80.
5. Годунов, А. И. Оценка качества имитируемой модели в технических средствах подготовки и обучения авиационных специалистов / А. И. Годунов, В. И. Мандриков, Б. Ж. Куатов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 296–300.
6. Кемалов, Б. К. К проблеме структурного синтеза моделирующей среды авиационного тренажера / Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 103–105.

Куатов Бауржан Жолдыбаевич

кандидат технических наук,
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)
E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru

Кемалов Берик Каирович

кандидат технических наук,
заместитель начальника департамента образования
и науки министерства обороны
Республики Казахстан,
(010000, Казахстан, г. Астана, пр. Достык, 14)
E-mail: kemalov.bk@gmail.com

Бикеев Ринат Равхатович

преподаватель,
кафедра воздушной навигации
и боевого применения авиации,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(463024, Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: rinat_bikeev@mail.ru

Kuatov Baurzhan Zholdybaevich

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

Kemalov Berik Kairovich

candidate of technical sciences,
deputy head of the department of education
and science of the Ministry of defence
of the Republic of Kazakhstan,
(010000, 14, Dostyk ave., Astana, Kazakhstan)

Bikeev Rinat Ravkhatovich

instructor,
sub-department of air navigation
and combat employment of aviation,
Military Institute of Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
named after T. Ya. Begel'dinov
(463024, 16 A. Moldagulova avenue,
Aktobe, Kazakhstan)

Аннотация. Проведен анализ работ, где делаются попытки по проверке адекватности как имитационного моделирования, так и самих тренажеров. Однако эти попытки ограничиваются определением факта адекватности или неадекватности проверяемых систем, что не может быть использовано для выявления приобретаемых на них навыков в соответствии с введенной обобщенной классификацией. Сама адекватность является сопутствующим признаком неадекватности применения тренажеров, так как существующая принятая база по оценке адекватности тренажеров не позволяет ее представить в виде индикатора сопутствующего признака неадекватности применения тренажеров, то первостепенной задачей является определение ее количественной формы, которая позволила бы устранить несоответствие оценок обученности. В данной научной статье представлены проблемы организации тренажной подготовки, которые независимо от принятых определений по планированию полетных заданий определяют конфликт применения летательных аппаратов, сущность которого состоит в наличии противоречий между прогнозируемым и действительно необходимым количеством сил и средств, обеспечивающих гарантированную эффективность. В работе предлагается адаптация содержательного компонента учебных планов для устранения неадекватности применения тренажеров, которая должна быть направлена на выработку мер по компенсации ложных навыков для повышения точности определения летных навыков при планировании тренажной подготовки.

Ключевые слова: тренажерная подготовка, навыки, курсант, летательные аппараты.

Abstract. The analysis works, where attempts have been made for the verification of the adequacy of both simulation and simulators. However, these attempts are limited to determining the adequacy or inadequacy of the scanned systems that cannot be used to identify the skills they acquired in accordance with the generic classification. The adequacy of collateral is itself a sign of inadequate use of simulators but because existing adopted base on evaluating the adequacy of simulators does not allow her to present as an indicator of a companion sign the inadequacy of the use of simulators, the priority is to identify its quantitative form, which would make it possible to remedy the non-conformity assessments of teaching. In this scientific article presents problems of simulators, the priority is to identify its quantitative form, which would make it possible to remedy the non-conformity assessments of teaching. In this scientific article presents problems of trenazhnoj training regardless of the adopted views on flight planning jobs real objectivity is conflict use of flying apparatus.

Key words: simulator training, skills, cadet, aircraft.

УДК 621.3.019

Куатов, Б. Ж.

Влияние адекватности тренажеров на планирования тренажной подготовки / Б. Ж. Куатов, Б. К. Кемалов, Р. Р. Бикеев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 76–81. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-11.

ПРЕПАРИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОСТНОГО РЕГЕНЕРАТА ПРИ НАСТРОЙКЕ СКАНИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ

С. И. Геращенко, С. М. Геращенко, С. Ю. Костенков,
Н. Н. Янкина, В. В. Карнаухов

В настоящее время актуальны исследования, способные повысить уровень биосовместимости имплантатов и протезов. Одним из наиболее эффективных методов решения этой проблемы является создание развитой поверхности. Особого внимания заслуживают технологии формирования развитой поверхности в виде микро- и макроаверн с отрицательными углами [1–3] и технологии электростимуляции [4], которые позволяют существенно увеличить допустимую нагрузку на имплант и протез, ускорить образование сети коллагеновых волокон и появление минеральных отложений на их поверхности (рис. 1).

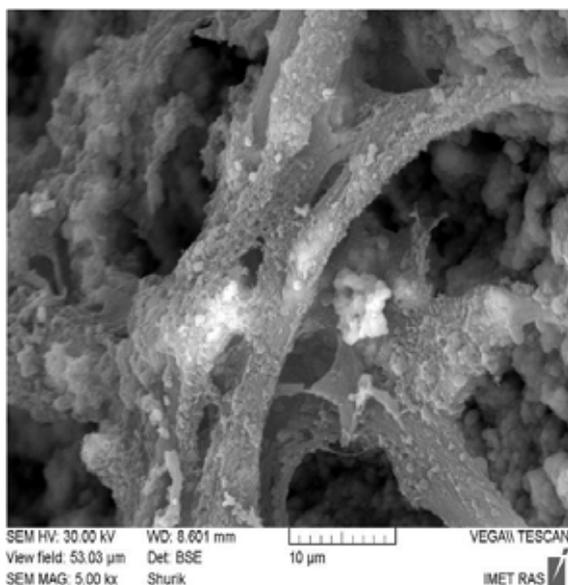


Рис. 1. Минеральные отложения на поверхности клеточных филаментов

Для объективной оценки процесса формирования костного регенерата необходимо производить оценку качественных характеристик процесса формирования костного регенерата. Для этих целей целесообразно использовать электронную микроскопию.

Представление информации с помощью электронной микроскопии в значительной степени зависит от настроек разрешающей способности. В этой связи для наблюдения за процессом формирования костного регенерата необходимы одинаковые условия для различных условий получения экспозиции. Для прецизионной настройки используются тестовые пластины (рис. 2).

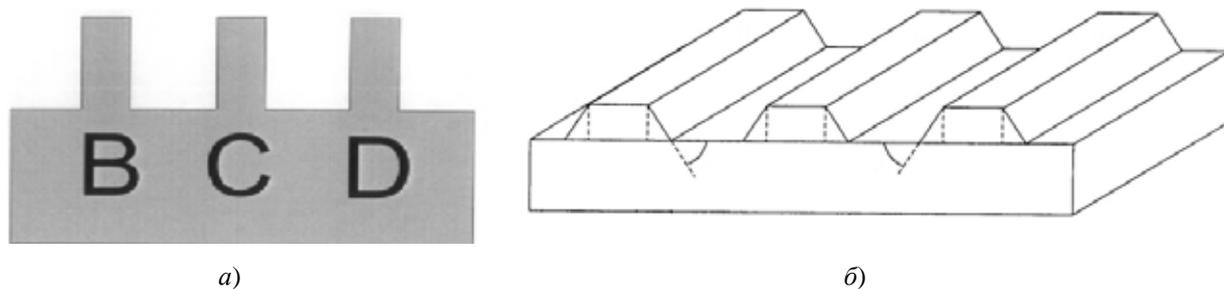


Рис. 2. Тестовые пластины для просвечивающих (а) и сканирующих (б) электронных микроскопов

Необходимыми этапами настройки и юстировки являются фокусировка и компенсации астигматизма. Эти процедуры выполняются поочередно до получения максимально четкого изображения.

Существующие тестовые пластины не в полной мере перекрывают весь диапазон возможных значений физических характеристик исследуемых объектов. Для того, чтобы восполнить пробел отсутствия тестовых систем, можно использовать электронные тесты, которые занимают промежуточную позицию. Вместо тестовых элементов используются тестовые изображения (рис. 3).

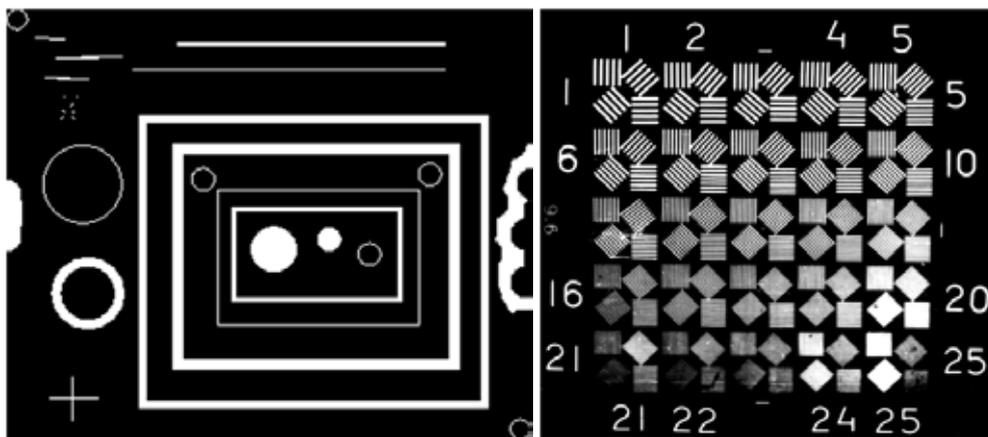


Рис. 3. Тестовые изображения калибровки сканирующих микроскопов

Яркость и контрастность являются важными параметрами изображения. При настройке этих параметров необходимо руководствоваться принципом максимальной информативности изображения. Избыточная контрастность и недостаточная яркость приводят к появлению на изображении черных и белых областей, детали которых становятся неразличимыми. Недостаточная контрастность и избыточная яркость приводят к уменьшению контраста, объекты сливаются друг с другом.

Помимо описанных способов юстировки сканирующих микроскопов и характеристик объектов и изображений, на которые делается акцент при проведении калибровочных работ, предлагается использовать препарирование получаемых изображений и выделение исследуемых объектов. Это позволит определить однотипные настройки сканирующего прибора при разных уровнях разрешающей способности и исключить их влияние на качество представления данных при контроле процесса формирования костного регенерата.

Процесс препарирования изображений состоит из минимизации визуальной информации и сегментирования сложных многосвязных плоских образов изображений.

Минимизация исходной информации может быть аппаратной или алгоритмической, но такое разделение минимизации условно. Устройства, осуществляющие аппаратную и алгоритмическую минимизацию, могут быть построены по различным принципам.

Устройство, реализующее аппаратный способ минимизации, работает по принципу сравнения яркости точек изображения с уровнем сигнала от фона изображения. При этом устройство позволяет осуществлять представление информации в адресном и безадресном режимах.

При адресном режиме ввода i -й элемент дискретизации изображения объекта представляется как точка с координатами x_i, y_i, B_i ; при безадресном режиме ввода i -му элементу дискретизации присваивается только код яркости B_i (формирование координат точек изображения при этом ведется программным путем). Для экономии объема памяти в системе считывания и ввода информации в машину целесообразно иметь оба режима работы.

Алгоритмическая минимизация изображения реализуется программным способом. При этом исключаются все внутренние точки односвязных контуров, составляющих изображение объекта. В результате остаются только точки (в данном случае пара контурных точек для каждого элемента дискретизации), которые относятся к контурным линиям.

Пусть в качестве исходной информации имеется пиктурное изображение, представляющее собой многосвязный контур, состоящий из четырех односвязных геометрических контуров. Поле

наблюдения условно разбито на строки и столбцы. На пересечении j -й строки и i -го столбца находится элемент дискретизации с яркостью B_{ij} . Чтобы определить, принадлежит он к контурной линии или нет, проводится сравнение его яркости с яркостями смежных элементов дискретного раstra. Условием принадлежности элемента раstra к контурной линии является выполнение следующего неравенства [5]:

$$G = |B_{i-1,j} - B_{ij}| + |B_{i,j-1} - B_{ij}| + |B_{i,j+1} - B_{ij}| + |B_{i+1,j} - B_{ij}| > 0 \quad (1)$$

при $B_{ij} \neq B_{\phi}$, где B_{ϕ} – код яркости фонового элемента. Если $G = 0$, то это означает, что элемент B_{ij} не лежит на границе односвязной области.

Для удобства последующей работы алгоритма распознавания часто, как это сделано в рассматриваемом случае, каждой точке внутренней контурной линии ставятся в соответствие две смежные по строке точки со своими яркостями. Координаты этих точек могут отличаться друг от друга на один элемент дискретизации раstra. Результатом работы этого алгоритма минимизации являются массивы точек контурных линий.

Следующим этапом обработки информации является также препарирование многосвязного контура на односвязные. В качестве исходной информации здесь предполагается массив контурных точек, полученных при минимизации информации. Наиболее простыми и эффективными при реализации сегментирования сложных изображений являются принципы формирования односвязных контуров, основанные на сравнении по ряду критериев элементов дискретизации, описывающих исходную многосвязную геометрическую систему.

Пусть имеется исходный массив контурных точек – поле поиска. При формировании любого односвязного контура можно выделить ячейку TH для записи начального элемента выделяемого контура и ячейку T для записи текущей опорной точки, по отношению к которой в поле поиска имеется ближайшая точка, принадлежащая этому контуру. В дальнейшем обозначения TH и T будут соответствовать начальной и текущей опорным точкам анализируемых контуров.

Процесс формирования односвязного контура состоит из трех этапов [2].

Этап 1. Выбор опорной точки T .

Этап 2. Нахождение точки в поле поиска, ближайшей к опорной.

Этап 3. Пересылка найденного в поле поиска элемента контура в массив точек формируемого односвязного контура.

Сначала из массива поля поиска выбирается произвольная точка, которая становится опорной. Условиями выбора ближайшей точки по отношению к опорной являются следующие:

а) точки должны иметь одинаковую яркость:

$$B_T = B_k, \quad (2)$$

где B_T и B_k – яркости соответственно опорной точки T и выбранной из массива поля поиска точки k ;

б) точки должны располагаться близко друг к другу. Это условие проверяется по неравенству [2]

$$(x_T - x_k)^2 + (y_T - y_k)^2 \leq 2. \quad (3)$$

Однако этих двух условий не всегда бывает достаточно для правильного выбора точки k , ближайшей к опорной точке. Поэтому для правильного выбора точки k необходимо дополнительное условие, характеризующее направление движения при формировании односвязных контуров. С этой целью вводится понятие элементарного вектора – вектора V_i , соединяющего два элемента дискретизации изображения (точки выделяемых контуров – точки T и k , параметры которых удовлетворяют условиям (2) и (3)) и направленного от точки T к точке k . Всего таких векторов V_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) может быть восемь. Проекции этих векторов Vx_i и Vy_i на оси координат сведены в табл. 1.

Один из восьми векторов V_i указывает «направление входа» вектора V_8 в k_{j+1} -й элемент дискретизации и выходит из точки T_j , которая была опорной на предыдущем шаге препарирования. Угол, характеризующий направление этого вектора, отсчитывается от направления аналогичного вектора V_i , имевшего место на предыдущем шаге препарирования.

Таблица 1

Проекция векторов обхода матрицы изображения

Номер вектора V_i	Проекция вектора V_i		Номер вектора V_i	Проекция вектора V_i	
	Vx_i	Vy_i		Vx_i	Vy_i
1	-1	1	5	1	-1
2	0	1	6	0	-1
3	1	1	7	-1	-1
4	1	0	8	-1	0

Если в качестве единицы угла поворота элементарного вектора возьмем угол, равный 45° , то каждому из восьми векторов V_i можно поставить в соответствие некоторое число $u_i = Ent(4\alpha/\pi)$.

Следует учесть, что из всех точек, удовлетворяющих условиям (2) и (3), ближайшей будет считаться та, которой соответствует число

$$u_i = u_{i \min} = \min_{V_i} \left[Ent \left(\frac{4\alpha}{\pi} \right) \right]. \tag{4}$$

Это условие и берется в качестве дополнительного [2]. Исходными данными для его реализации являются две опорные точки T_{j-1} – предыдущего и T_j – текущего шага препарирования контуров и направление вектора V_i (по которому был осуществлен переход в опорную точку текущего шага выделения односвязного контура) в виде проекций Vx_i и Vy_i элементарного вектора на оси координат.

Процесс определения числа u_i состоит в последовательном повороте через 45° вектора V_i и вычислении всякий раз числа u_i при выполнении двух отмеченных ранее условий.

Для реализации поворота элементарного вектора можно воспользоваться на каждом шаге препарирования выражениями, позволяющими найти проекции повернутого вектора V_{i+1} через проекции исходного вектора V_i :

$$Vx_{i+1} = 0,5 (2 - Vx_i Vy_i) (Vy_i + Vx_i), Vy_{i+1} = 0,5 (2 + Vx_i Vy_i) (Vy_i - Vx_i). \tag{5}$$

В табл. 2 приведены восемь преобразований элементарных векторов. На каждом шаге препарирования сравниваются параметры начальной TH и текущей опорной T точек. При совпадении параметров этих точек выделение односвязного контура заканчивается. Затем из массива поля поиска выбирается новая начальная точка, и весь процесс повторяется до тех пор, пока не будет полностью использован исходный массив точек поля поиска.

Таблица 2

Преобразованные элементарные вектора

Положение вектора V_i	Новое положение вектора V_{i+1}	Проекция вектора V_i		Преобразование координаты вектора Vx_{i+1}	Преобразование координаты вектора Vy_{i+1}
		Vx_i	Vy_i		
→	↘	+1	0	$(2-1.0)(0+1):2 = +1$	$(2+1.0)(0-1):2 = -1$
↘	↓	+1	-1	$(2+1)(-1+1):2 = 0$	$(2-1.1)(-1-1):2 = -1$
↓	↙	0	-1	$(2-0.1)(-1+0):2 = -1$	$(2-1.0)(-1-0):2 = -1$
↙	←	-1	-1	$(2-1.1)(-1-1):2 = -1$	$(2+1.1)(-1+1):2 = 0$
←	↖	-1	0	$(2+1.0)(0-1):2 = -1$	$(2-1.0)(0+1):2 = +1$
↖	↑	-1	+1	$(2+1.1)(1-1):2 = 0$	$(2-1.1)(1+1):2 = +1$
↑	↗	0	+1	$(2-1.0)(1+0):2 = +1$	$(2+1.0)(1-0):2 = +1$
↗	→	+1	+1	$(2-1.1)(1+1):2 = +1$	$(2+1.1)(1-1):2 = 0$

Если на очередном j -м шаге поиска новой опорной точки ее не оказывается, то делается шаг «назад», т.е. за опорную принимается точка T_{j-1} предыдущего шага препарирования и т.д. В этом случае формирование односвязного контура заканчивается тогда, когда нужно сделать шаг «назад» за начальную точку TH .

Результат работы алгоритма препарирования – сформированные в памяти массивы точек (x_i, y_i, B_i) односвязных контуров, над которыми в дальнейшем проводится процедура их распознавания («binary gradient mask» рис. 4).

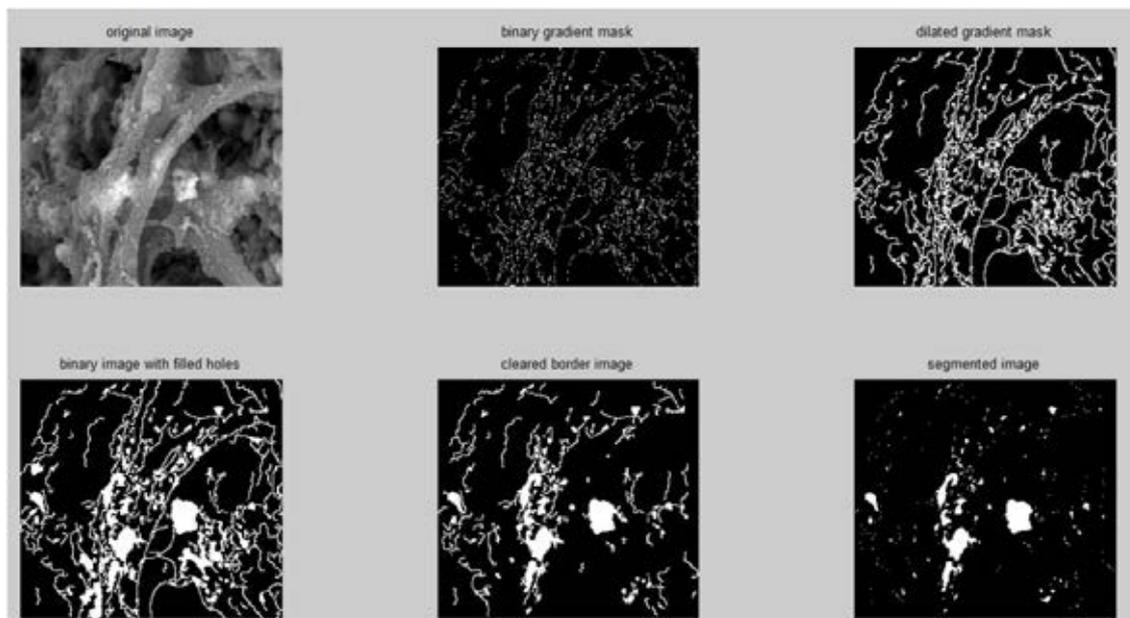


Рис. 4. Препарирование изображения имплантата

На рис. 4 представлен результат работы алгоритма, осуществляющего выделение контуров отдельных объектов многоградационного изображения в *MATLAB*.

Сегментирование изображения позволяет выделить объект исследования. Полученное изображение минеральных отложений на поверхности коллагеновых волокон (рис. 5) подвергается дальнейшей обработке в *Image Processing Toolbox* пакета *MATLAB*.

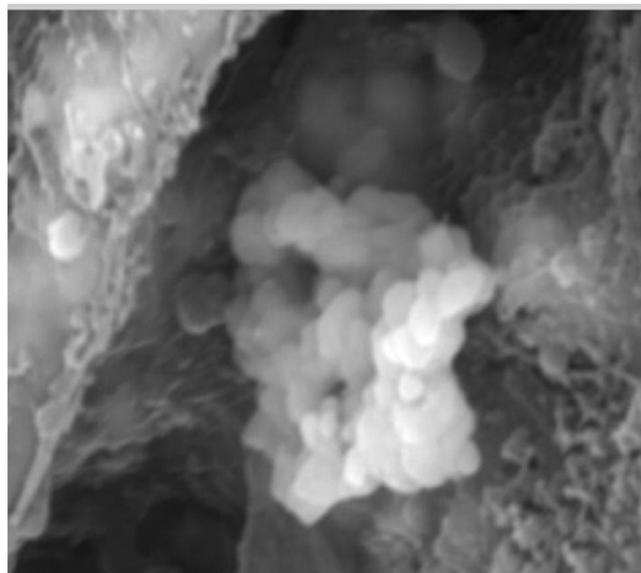


Рис. 5. Минеральные отложения на поверхности коллагеновых волокон

Для контрастирования изображения с последующей гамма-коррекцией (рис. 6) используется функция *imadjust*. Чтобы изображение было полным (охвачен весь динамический диапазон), указывается интервал $[0,1]$.

Далее производится обнаружение полного объекта (рис. 7).

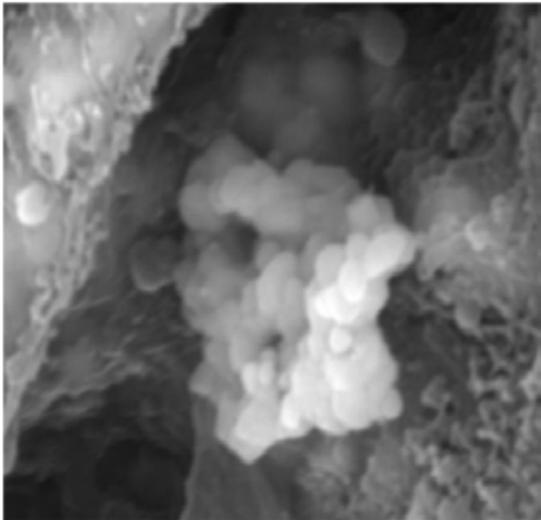


Рис. 6. Контрастированное изображение

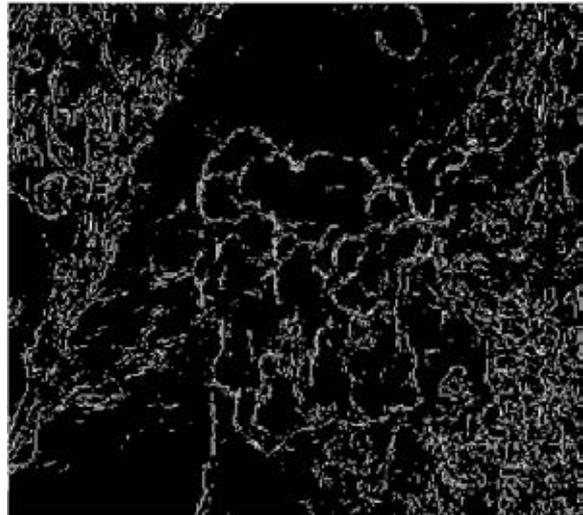


Рис. 7. Бинарная маска градиента изображения

Оригинальное изображение, представленное на рис. 5, содержит минеральные отложения, но некоторые из них граничат с краем изображения. Нужно обнаружить и исключить неполные объекты. Одним из способов обнаружения только целого и полого объекта будет сегментация. Объект, который будет сегментирован, сильно отличается по контрасту от фонового изображения. Отличия в контрасте могут быть обнаружены операторами, которые вычисляют градиент изображения. Например, оператор «Sobel» создает бинарную маску, используя точное пороговое значение, установленное пользователем. Можно определить пороговое значение, используя функцию *graythresh*. Чтобы создать двоичную (бинарную) маску градиента, была использована функция *edge*.

Двоичный градиент маскирует в изображении показ линий высокого контраста. Эти линии совсем не очерчивают схему интересующих объектов. По сравнению с первоначальным изображением в маске градиента можно увидеть на линиях промежутки, окружающих объект. Эти линейные промежутки исчезнут, если изображение маски градиента расширить, используя линейные элементы структурирования, которые создаются функцией *strel*.

Бинарная маска градиента расширена использованием вертикально- и горизонтально-структурирующими элементами. А функция *imdilate* расширяет изображение (рис. 8).

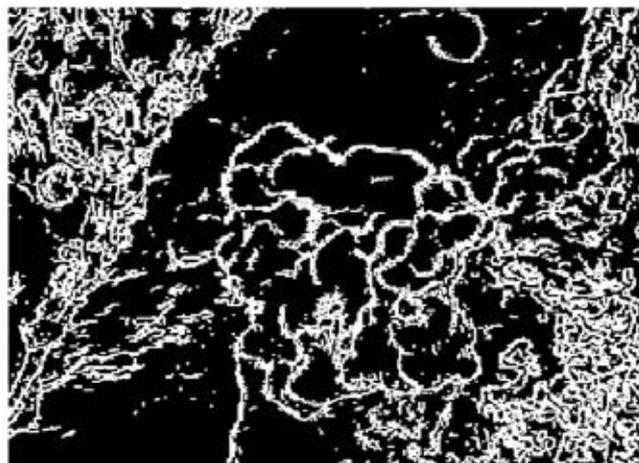


Рис. 8. Расширенная бинарная маска изображения

Расширенная маска градиента показывает схему бесшумности (неразрывности) внешних границ объектов, но есть все еще отверстия или зашумленность внутри объектов. Для заполнения этих отверстий используется функция *imfill* (рис. 9).

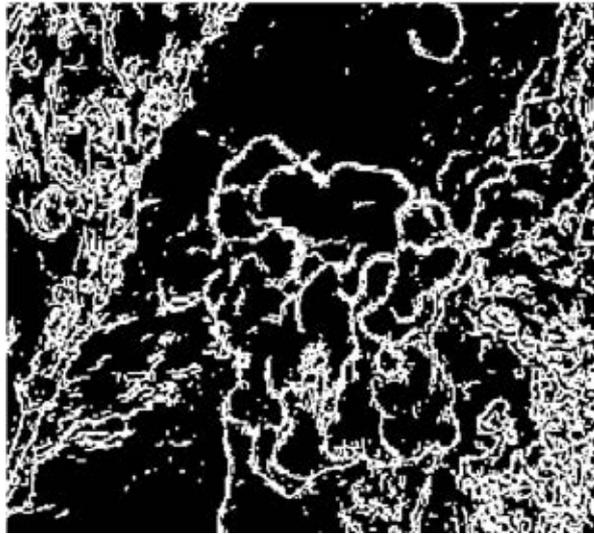


Рис. 9. Заполненная бинарная маска изображения

Интересующие объекты были успешно сегментированы, но найдены они не единственные. Все объекты, связанные с границей изображения, могут быть удалены с помощью функции *imclearborder* (рис. 10). Чтобы удалить диагональные соединения, для функции *imclearborder* был задан параметр равный четырем.

Наконец, чтобы сегментированные объекты выглядели естественными, нужно выровнять их границы. Для этого необходимо дважды разрушить изображение с помощью ромбового структурирующего элемента (рис. 11). Создается ромбовый структурирующий элемент использованием функции *strel*.



Рис. 10. Удаление граничных элементов

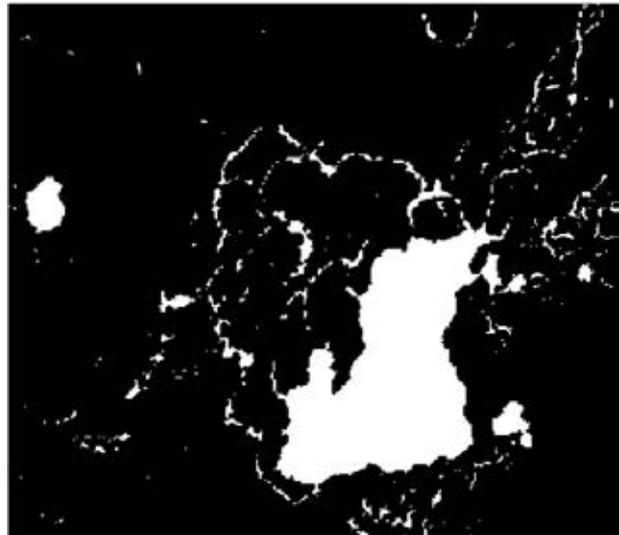


Рис. 11. Выравнивание границ

В дополнение, чтобы показать сегментированный объект, выделенные контуры маски изображения накладываются на оригинальное изображение. Такое наложение реализовано функцией *bwperim* и представлено на рис. 12.

Как видно из рис. 12, по результатам препарирования изображения, полученного сканирующей электронной микроскопией коллагеновых волокон, выделен объект минеральных отложений на них.

Процесс препарирования изображений автоматизируется приведенным методом в программное приложение и позволяет оценить возможность выделения объекта исследования на исходном изображении.

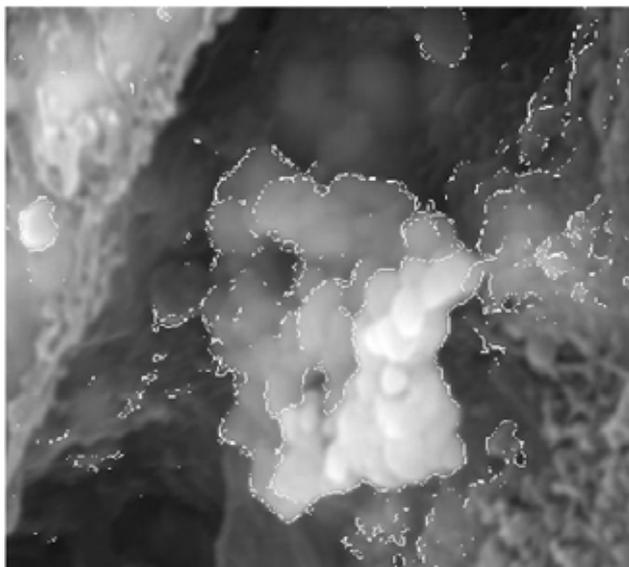


Рис. 12. Наложение сегментированного объекта на исходное изображение

Заключение

При сканирующей электронной микроскопии получение качественных изображений очень малых объектов существенно зависит от настроек микроскопа и физических свойств исследуемого объекта. При разных физических свойствах и размерах требуются тестирование и настройка электронного микроскопа для проведения исследований. Существуют тестовые пластины, которые позволяют проводить настройку, но они имеют существенный недостаток, их свойства не в полной мере перекрывают весь диапазон возможных значений физических характеристик исследуемых объектов. Для качественной оценки процесса формирования костного регенерата необходимо дополнительно применять электронные тесты, производить юстировку сканирующих электронных микроскопов с препарированием получаемых изображений и выделением исследуемых объектов.

Список литературы

1. Пат. 127617 Российская Федерация, МПК А 61 С8/00. Зубной имплантат / Геращенко С. И., Евдокимов С. В., Митрошин А. Н., Фандеев В. П. – № 2012156743/14 ; заявл. 25.12.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13.
2. Formation of the porous structure of material surface using the method of laser processing / A. N. Mitroshin, S. I. Gerashchenko, S. M. Gerashchenko, N. N. Yankina, A. V. Vertaev // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2015. – Т. 6, № 1. – С. 1869–1874.
3. Experimental evaluation of the modes of laser processing of the surface of implants and prostheses / A. N. Mitroshin, S. I. Gerashchenko, S. M. Gerashchenko, N. N. Yankina, I. E. Talianskii // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2015. – Т. 6, № 1. – С. 1862–1868.
4. Разработка методики электрохимического лизиса злокачественных новообразований / М. А. Сыскова, С. И. Геращенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 366–368.
5. Анисимов, Б. В. Распознавание и цифровая обработка изображений : учеб. пособие для студентов / Б. В. Анисимов, В. Д. Курганов, В. К. Злобин. – М. : Высш. шк., 1983. – 295 с.

Геращенко Сергей Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой медицинской кибернетики
и информатики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, Красная, 40)
E-mail: mpo@list.ru

Gerashchenko Sergey Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of medical cybernetics
and informatics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геращенко Сергей Михайлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра медицинской кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, Красная, 40)
E-mail: gsm@pnzgu.ru

Костенков Сергей Юрьевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, Красная, 40)
E-mail: panthfinder@mail.ru

Янкина Наталья Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра медицинской кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, Красная, 40)
E-mail: prisend@yandex.ru

Карнаухов Виктор Вячеславович

студент,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mpo@list.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Представление информации о процессе остеоинтеграции с помощью сканирующей электронной микроскопии в значительной степени зависит от настроек разрешающей способности микроскопа. Для качественной оценки процесса формирования костного регенерата необходимо обеспечивать объективность процедур применяемых измерительных информационных технологий. Использование компьютерной техники, обеспечивающей обработку исходной информации, требует гарантированной точности и метрологической надежности представления данных. В этой связи задача обеспечения однотипных настроек для различных условий получения экспозиции становится неотъемлемой частью измерительных процедур и является актуальной. **Материалы и методы.** Для настройки на однотипные режимы предлагается использовать электронные тесты. Они позволяют менять яркость и контрастность изображения по принципу максимальной информативности изображения. Также предлагается при юстировке сканирующих электронных микроскопов использовать препарирование получаемых изображений и выделение исследуемых объектов. Это позволяет установить однотипные настройки сканирующего микроскопа при разных уровнях разрешающей способности и исключить их влияние на качество представления данных при контроле процесса формирования костного регенерата. **Результаты.** Предложенная методика препарирования изображений процесса формирования костного регенерата при настройке сканирующих электронных микроскопов позволяет существенно повысить точность представления качественных характеристик процесса остеоинтеграции. Адекватность и надежность пред-

Gerashchenko Sergey Mihailovich

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

Kostenkov Sergey Yur'evich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yankina Natal'ya Nikolaevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of medical cybernetics and informatics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Karnaukhov Viktor Vyacheslavovich

student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. Background. Presentation of the process osteo-integration using scanning electron microscopy, is largely dependent on the settings of the resolution of the microscope. For the qualitative assessment of the formation of bone regeneration is necessary to ensure the objectivity of the measurement procedures used information technology. Using computer technology, providing the initial information processing requires guaranteed accuracy and metrological reliability of data. In this context, the task of providing the same type of settings for different conditions obtaining exposure, it becomes an integral part of the measurement procedure and is up to date. **Materials and methods.** To tune in to the same type modes are encouraged to use electronic tests. They allow you to change the brightness and contrast on the principle of maximum information content of the image. Also available during adjustment of scanning electron microscopes use a preparation of the images and the selection of the objects. This allows you to install the same type of configuration scanning microscope at different levels of resolution and eliminate their impact on the quality of reporting under the control of the formation of bone regeneration. **Results.** The proposed method of preparation of the formation of the image of the bone regenerate when configuring scanning electron microscopes can significantly improve the precision of the qualitative characteristics of osseointegration. Adequacy and reliability of the proposed measurement model is confirmed by experimental data. **Conclusions.** For the qualitative assessment of the formation of bone regenerate need to further use of electronic tests, to make the adjustment of scanning electron microscope images obtained from dissection and isolation of the objects.

ложенной измерительной модели подтверждена экспериментальными данными. *Выводы.* Для качественной оценки процесса формирования костного регенерата необходимо дополнительно применять электронные тесты, производить юстировку сканирующих электронных микроскопов с препарированием получаемых изображений и выделением исследуемых объектов.

Ключевые слова: остеоинтеграция, сканирующая микроскопия, тестовые объекты, настройка микроскопа, препарирование изображений.

Key words: ostiointegratsiya, the scanning microscopy, test objects, tuning microscope, the preparation of the images.

УДК 53.086

Препарирование изображений процесса формирования костного регенерата при настройке сканирующих электронных микроскопов / С. И. Герашенко, С. М. Герашенко, С. Ю. Костенков, Н. Н. Янкина, В. В. Карнаухов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 82–91. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-12.

ПОСТРОЕНИЕ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ СЛОЖНОСОСТАВНОГО ГОРЮЧЕГО ГАЗА

Р. А. Штыков, Г. П. Разживина, Н. К. Юрков

Введение

В задаче определения температуры и плотности газа результаты, полученные на основе модели Я. Б. Зельдовича [1], имеют достаточное совпадение с экспериментом, при этом неуниверсальность и большой объем алгоритма определения концентраций компонентов при изменении количества активных компонентов, а также их состава показывают слабую сторону данной модели.

В связи с этим возникла необходимость разработки модификации модели Я. Б. Зельдовича, которая позволила бы привести к наименьшему количеству операций для определения температуры и плотности газа при известных значениях относительно избыточной концентрации и полной энтальпии.

Прототипом данной модели служила методика из курса практической теории горения [2], на основе которой определяется теоретически необходимое количество кислорода (или воздуха) для данной смеси горючих компонентов и правила аддитивности Кэя [3].

Постановка задачи

В турбулентном потоке коэффициенты «турбулентной» диффузии для всех компонентов для фиксированной точки области течения одинаковы. Это позволяет нам записать уравнения сохранения и переноса i -го компонента в единой форме

$$L(C_i) = \omega_i \quad (i = 1 \dots N), \quad (1)$$

где $L(C_i)$ – линейный и однородный относительно своего аргумента – массовой концентрации i -го компонента C_i оператор, а ω_i – массовая скорость образования (исчезновения) i -го сорта молекул в данной точке фронта пламени в течение единичного отрезка времени.

Предположим, что в движении участвуют компоненты X_i при $i = 1 \dots N$. Из них первый компонент представляет кислород O_2 , последующие N_A – реагирующие с кислородом горючие компоненты, а остальные – не реагирующие. Не реагирующими считаются n сортов (последние из N) химически пассивные и инертные газы (например, азот, аргон...), а также компоненты продуктов горения, так как реакции в модели считаются необратимыми.

Необходимо подчеркнуть, что горючие компоненты могут находиться только в смеси, а окислитель – только в кислородосодержащей среде.

Горючая смесь A , которую именуем далее «горючим», имеет в своем составе компоненты A_i из числа X_i ($i = 2 \dots N$) с объемными концентрациями $\langle n_i \rangle_A$, а кислородосодержащая смесь, именуемая в дальнейшем «воздухом», – из $B_i \in X_i$ ($i = 1, N_A + 1 \dots N$) с объемными концентрациями $\langle n_i \rangle_B$.

Построение модели

Известно, что для отдельно взятого горючего компонента A_k материальный баланс с учетом выделяемого тепла реакции горения имеет вид

$$A_k + \nu_{k1} O_2 \rightarrow \sum_{i=N_A+2}^{N-n} \nu_{ki} X_i + h_k^*, \quad (2)$$

где $k \in \{2 \dots N_A + 1\}$. Например, для случая горения водорода сумма справа представляет один продукт, а для метана – два.

Стехиометрическое уравнение (2) гласит, что 1 гмоль горючего компонента A_k , расходуя при горении $v_{k,1}$ гмоль молекулярного кислорода, образует по $v_{k,i}$ гмоль всевозможных продуктов горения X_i ($i = N_A + 2 \dots N - n$). При этом выделяется тепло в количестве h_k^* (Дж/гмоль).

Так как кислород, подаваемый в составе «воздуха» B , имеет концентрацию $\langle n_i \rangle_B$, то для полного сгорания 1 гмоль A_k потребуется $v_{k,1} / \langle n_i \rangle_B$ гмоль «воздуха». С учетом этого обстоятельства стехиометрическое уравнение (2) переписывается в виде

$$A_k + \frac{v_{k,1}}{\langle n_1 \rangle_B} B \rightarrow \sum_{i=N_A+2}^{N-n} v_{k,i} X_i + v_{k,1} \sum_{i=N_A+2}^N \frac{\langle n_i \rangle_B}{\langle n_1 \rangle_B} X_i + h_k^*, \quad (3)$$

где вторая сумма в правой части представляет собой состав «воздуха» за исключением кислорода.

Учитывая то, что горючие и негорючие компоненты A_k ($k \in 2, 3, \dots, N$) составляют $\langle n_k \rangle_A$ объемную часть 1 гмоль «горючего», вводим обозначение «горючего» – A

$$A = \sum_{k=2}^N \langle n_k \rangle_A X_k. \quad (4)$$

Чтобы получить «горючее» A в левой части стехиометрического уравнения с полным составом, (3) умножим на $\langle n_k \rangle_A$ и суммируем по k от двух до $N_A + 1$ (т.е. по всем горючим компонентам). Прибавим к обеим сторонам этой суммы члены $\langle n_k \rangle_A X_k$ ($k \in N_A + 1 \dots N$), представляющие химически пассивную и инертную часть «горючего», и окончательно получим

$$A + \sum_{k=2}^{N_A+1} \langle n_k \rangle_A \frac{v_{k,1}}{\langle n_1 \rangle_B} B \rightarrow \sum_{k=2}^{N_A+1} \langle n_k \rangle_A \sum_{i=N_A+2}^{N-n} v_{k,i} X_i + \sum_{k=2}^{N_A+1} \langle n_k \rangle_A \sum_{i=N_A+2}^{N-n} v_{k,1} \frac{\langle n_i \rangle_B}{\langle n_1 \rangle_B} X_i + \sum_{k=N_A+1}^N \langle n_k \rangle_A X_k + \sum_{k=2}^{N_A+1} \langle n_k \rangle_A h_k^*. \quad (5)$$

Правую часть уравнения (5) можно записать в коротком виде $v_D D + h_A^*$, где D – «продукт горения», представляющий одновременно продукты горения и пассивные составляющие «горючего» и «воздуха».

Для определения молекулярной массы и теплоемкости «продукта горения» необходимо знать его объемный состав. А определение объемного состава «продукта горения» при известных значениях $\langle n_k \rangle_A$ и $\langle n_k \rangle_B$ не составляет труда. Например, компонент X_j составляет

$$v_j^{(D)} = \begin{cases} \langle n_j \rangle_A + \sum_{k=2}^{N_A+1} \langle n_k \rangle_A \left(v_{k,j} + \frac{v_{k,1} \langle n_j \rangle_B}{\langle n_j \rangle_B} \right) & \text{при } j = N_A + 1 \dots N - n \\ \langle n_j \rangle_A + \sum_{k=2}^{N_A+1} \langle n_k \rangle_A \langle n_k \rangle_B \frac{v_{k,1}}{\langle n_1 \rangle_B} & \text{при } j = N - n = 1 \dots N \end{cases} \quad (6)$$

гмоль части из общего

$$v_D = \sum_{j=N_A+1}^N v_j^{(D)} \quad (7)$$

гмоль объема «продукта горения». С помощью (6) и (7) определяется молярная масса 1 гмоль «продукта горения»

$$m_D = \sum_{j=N_A+2}^N v_j^{(D)} m_j / v_D. \quad (8)$$

С помощью (6)–(8) последовательно определяются объемные

$$\langle n_j \rangle_D = v_j^{(D)} / v_D \quad (9)$$

и массовые концентрации

$$\langle C_j \rangle_D = v_j^{(D)} m_j / (v_D m_D) \quad (10)$$

отдельно взятых компонентов X_j ($j = N_A + 2..N$) в «продукте горения», а также теплоемкости D при постоянном давлении

$$c_{pD} = \sum_{j=N_A+2}^N \langle C_j \rangle_D c_{pj} \quad (11)$$

Таким образом, приведенные выше формулы определяют единое стехиометрическое уравнение



где параметры «горючего» A определяется в виде

$$v_A = 1, \quad (13)$$

$$m_A = \sum_{j=2}^N \langle n_j \rangle_A m_j, \quad (14)$$

$$c_{pA} = \sum_{j=2}^N \langle C_j \rangle_A c_{pj}, \quad (15)$$

$$h_A^* = \sum_{j=2}^N \langle C_j \rangle_A h_j^*; \quad (16)$$

параметры «воздуха» B :

$$v_B = \sum_{j=1;N_A+2}^N v_{j,1} \langle n_j \rangle_B / \langle n_1 \rangle_B, \quad (17)$$

$$m_B = \sum_{j=1;N_A+2}^N \langle n_j \rangle_B m_j, \quad (18)$$

$$c_{pB} = \sum_{j=1;N_A+2}^N \langle C_j \rangle_B c_{pj}, \quad (19)$$

а параметры «продукта горения» D – согласно формулам (6)–(11).

Полученные формулы достоверны также для случая, когда в составе «горючего» имеется один горючий компонент. Чтобы убедиться в этом, необходимо повторить весь ход мышления для указанного случая.

Реализации полученного единого стехиометрического уравнения при решении задач с помощью метода введения нормированной функции Шваба – Зельдовича

Так как рассматриваемые обобщенные компоненты учитывают все составляющие, которые имеют одинаковые скорости и коэффициенты диффузии в фиксированной точке уравнения сохранения i -го компонента (1), можно представить для «компонентов» в виде

$$L(C_\alpha) = \omega_\alpha \quad (20)$$

при $\alpha = A, B, D$.

Сравнивая данную задачу с задачей Я. Б. Зельдовича [1], убедимся в том, что индексы компонентов от 1, 2, 3 перешли в A, B, D , а уравнение для четвертого компонента – химически пассивного газа – выпало, ибо нереагирующие компоненты включены в составы A, B и D .

Концентрации компонентов в зонах определяются из [4], а фронт пламени – по формуле

$$\bar{C} = \Omega_{DA}.$$

Необходимые для дальнейшего расчета молярная масса и теплоемкость (при постоянном давлении) смеси «компонентов» определяются по известным формулам

$$m = \left(\sum_{\alpha=A,B,D} C_\alpha / m_\alpha \right)^{-1}, \quad (21)$$

$$c_p = \sum_{\alpha=A,B,D} C_\alpha c_{p\alpha}. \quad (22)$$

Если возникает необходимость определения массовой концентрации отдельно взятой X_i компоненты, то при известных значениях C_A , C_B и C_D она определяется по следующим формулам:

для кислорода ($i=1$)

$$C_1 = \frac{m_1}{m} < C_1 >_B C_B;$$

для горючих компонентов ($i = 2, 3, \dots, N_A + 1$)

$$C_i = \frac{m_1}{m} < C_i >_A C_A;$$

для остальных компонентов ($i = N_A + 2, N_A + 3, \dots, N$)

$$C_i = \frac{m_1}{m} (< C_i >_A C_A + < C_i >_B C_B + < C_i >_D C_D).$$

Проверкой можно убедиться, что сумма концентраций отдельных компонентов равна единице, что служит в пользу достоверности формул.

Заключение

По предложенной модификации модели Я. Б. Зельдовича составлена программа, где на основе объемных концентраций компонентов «горючего» и «воздуха», их стехиометрических уравнений, молярных масс, теплоемкостей при постоянном давлении и теплотворных способностей горючих компонентов однозначно определяются необходимые параметры «горючего», «воздуха» и «продукта горения».

Последовательность выполняемых операций можно представить в виде:

- ввод молярных масс, теплоемкостей при постоянном давлении, стехиометрических коэффициентов реакций горения отдельных горючих компонентов в кислороде, теплотворных способностей горючих компонентов, а также объемных концентраций «горючего» и «воздуха»;
- вычисление объемного состава «продукта горения» согласно (6) и общего объема «продукта горения», образованного при сгорании 1 г моль «горючего» A , согласно (7);
- определение молярной массы, объемных и массовых концентраций компонентов в «продукте горения» и его теплоемкости при постоянном давлении согласно (8)–(12);
- определение стехиометрических коэффициентов, молекулярных масс, теплоемкостей, «горючего» и «воздуха», а также теплотворной способности «горючего» согласно (13)–(19);

– вычисление значений коэффициентов $\Omega_{\alpha\beta}$ и значения функции \bar{C}^* , соответствующее фронту пламени.

Список литературы

1. Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович. – М., 1980. – 478 с.
2. Иссерлин, А. С. Основы сжигания газового топлива / А. С. Иссерлин. – Л., 1987. – 336 с.
3. Коротаев, Ю. П. Добыча, транспорт и подземное хранение газа / Ю. П. Коротаев, А. И. Ширковский. – М., 1997. – 487 с.
4. Штыков, Р. А. Модификация модели диффузионного горения газа с одним горючим компонентом и окислителем / Р. А. Штыков // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – № 1. – С. 73–79.

Штыков Роман Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики и прикладной математики,
Муромский институт
Владимирского государственного университета
(602264, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)
E-mail: ipmroman@yandex.ru

Разживина Галина Петровна

доцент,
кафедра инженерной экологии,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: office@pguas.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. В турбулентном режиме течения учет многокомпонентности горючего газа приводит к вопросу о построении единого стехиометрического уравнения химических превращений, т.е. можно игнорировать вопрос об обеспечении стехиометрического поступления химически активных газов к фронту пламени, который является краеугольным камнем при моделировании диффузионного горения одно- и многокомпонентной горючей смеси в ламинарных потоках.

Ключевые слова: диффузионное горение, газ, окислитель, горючий газ, модель, метан, факел.

Shtjkov Roman Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
(602264, 23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

Razzhivina Galina Petrovna

associate professor,
sub-department of environmental engineering,
Penza State University of Architecture and Construction
(440028, 28 German Titov street, Penza, Russia)

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. In turbulent flow accounting multicomponent combustible gas leads to the question of the construction of a single stoichiometric equation of chemical transformations. Those. You can ignore the question of ensuring the stoichiometric receipt of reactive gases to the flame front, which is the cornerstone for modeling the diffusion burning single- and multi-component combustible mixture in laminar flow.

Key words: diffusion combustion, gas, oxidizer, flammable gas, model, methane, torch.

УДК 681.324

Штыков, Р. А.

Построение стехиометрического уравнения для сложносоставного горючего газа / Р. А. Штыков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 92–96. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-13.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 620.92

DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-14

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕТРОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Д. А. Елинов, О. В. Бирюкова, А. И. Долотин

Актуальность

Борьба с глобальным потеплением и ограничение техногенного воздействия на окружающую среду являются одними из наиважнейших задач, стоящих перед человечеством. Согласно прогнозам [1] температура на планете к 2100 г. может подняться на 4 °С. Серьезность проблемы подтверждается рядом международных документов и соглашений, содержащих меры по ограничению выбросов парниковых газов. В частности, в рамках 21-й международной конференции по климату, прошедшей в Париже, было принято соглашение, поставившее целью не допустить повышения температуры на планете более чем на 2 °С. При этом основным путем достижения этой цели является снижение выбросов парниковых газов в атмосферу странами-подписантами. На рис. 1 приведены объемы выбросов парниковых газов по отраслям в Российской Федерации согласно данным отчетов [2].

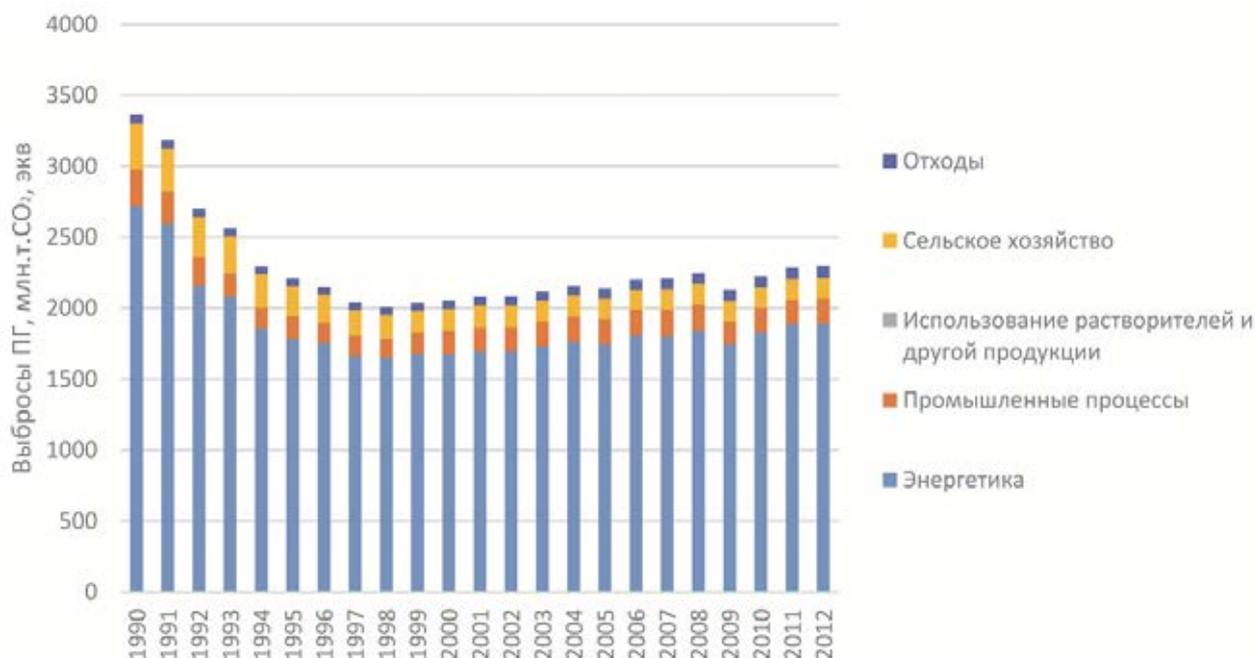


Рис. 1. Объемы выбросов парниковых газов по отраслям в 1990–2012 гг.

Таким образом доля выбросов парниковых газов наиболее существенна в энергетике и составляет порядка 80 % от общего объема выбросов по стране. Следовательно, производство энергии играет основную роль в загрязнении окружающей среды парниковыми газами и является наиболее перспективной областью для внедрения инноваций, снижающих выбросы. На рис. 2 приведены данные по разным странам [3], показывающие объем выброса парниковых газов при производстве электроэнергии.

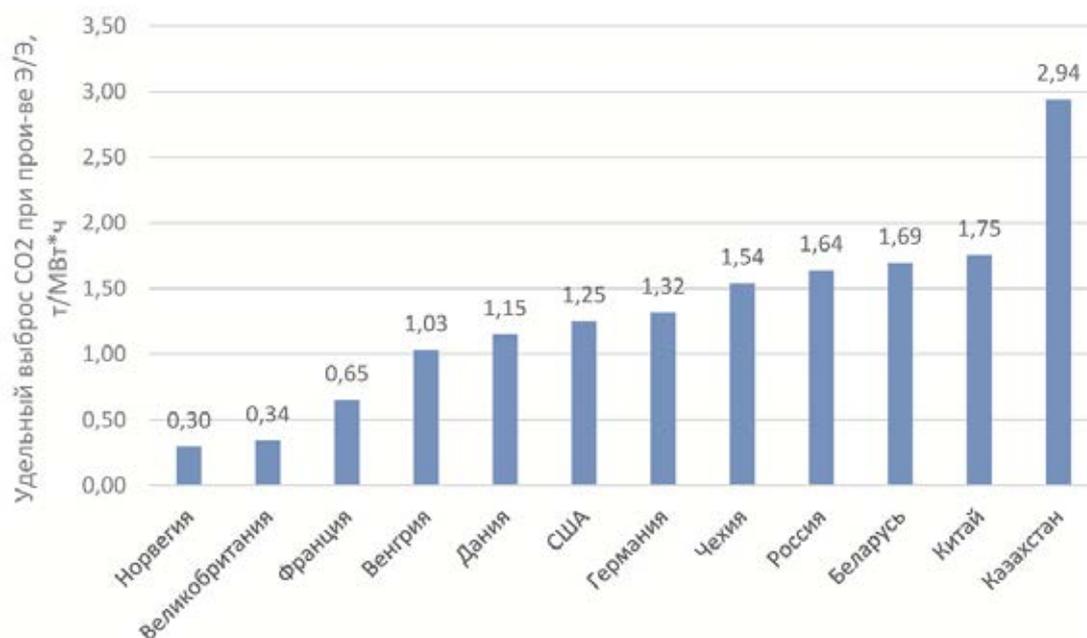


Рис. 2. Удельный выброс CO₂ при производстве электроэнергии

Решением, позволяющим снизить выброс парниковых газов в атмосферу, может стать использование возобновляемых источников электроэнергии. На рис. 3 приведены показатели выброса парниковых газов при производстве электроэнергии на различных типах электростанций [4].

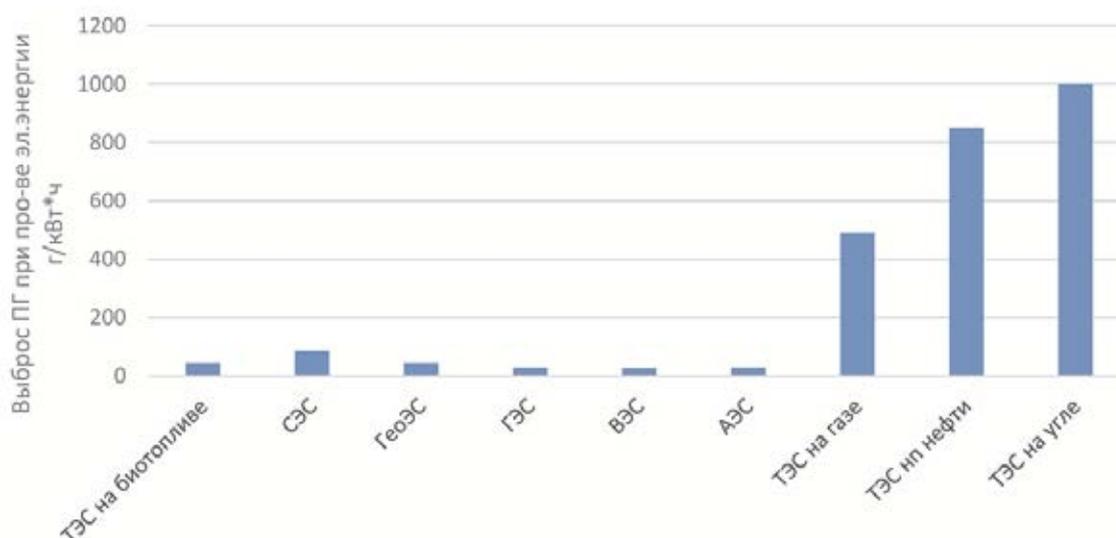


Рис. 3. Количество парниковых газов, выбрасываемых в окружающую среду при производстве электроэнергии

Таким образом, рассмотрение возможности применения электростанций на возобновляемых источниках электроэнергии представляется актуальной задачей.

Структура генерации электрической энергии в Пензенской области

На территории Пензенской области расположены следующие электростанции:

- 1) ТЭЦ-1, установленная мощность 385 МВт;
- 2) ТЭЦ-2, установленная мощность 16 МВт;
- 3) ТЭЦ-3, установленная мощность 4 МВт.

При этом максимальное потребление электрической мощности в 2015 г. согласно данным системного оператора [5] составило 828,4 МВт. Выработка электроэнергии составила 2511,7 млн кВт·ч, потребление – 8075 млн кВт·ч.

Таким образом, установленная мощность генераторов в Пензенской области покрывает 49 % пикового потребления, а собственная генерация покрывает только 31 % от нужд энергопотребления. Следовательно, регион является энергодефицитным, и развитие собственной генерации является актуальной задачей. Кроме того, вся генерация осуществляется на электростанциях на невозобновляемых источниках электроэнергии.

Оценка ветровых ресурсов Пензенской области

Пензенская область расположена между 42° и 47° восточной долготы и между 54° и 52° северной широты в зоне с умеренно-континентальным климатом. Пензенская область находится на четвертом месте в Приволжском федеральном округе по валовому потенциалу ветровой энергии [6].

На основе данных с метеостанций в период с 09.02.2015 по 09.02.2016 г. была проведена оценка ветровых ресурсов на территории Пензенской области в следующих точках (рис. 4):

- а) Кузнецк (м/с 27927);
- б) Сердобск (м/с 34056);
- в) Пачелма (м/с 27858);
- г) Исса (м/с 27760).



Рис. 4. Расположение контрольных точек на карте Пензенской области

По результатам анализа были построены ветровые диаграммы, приведенные на рис. 5.

Как видно из диаграмм, на территории Пензенской области преобладают западные ветры со скоростью ветра 2–4 м/с, и только на севере области преобладают ветры со скоростью 4–7 м/с.

Были произведены расчеты удельной мощности ветрового потока по следующей формуле [7]:

$$P_y = 0,59 \cdot 0,5\rho V^3, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха (1,225 кг/м³); V – скорость воздушного потока; а также удельной выработки электроэнергии в год (кВт·ч/м²):

$$W_y = 8,76 \cdot 10^{-2} D_{\%} P_y, \quad (2)$$

где $D_{\%}$ – доля случаев ветра заданного диапазона скоростей (%); P_y – удельная мощность для заданного диапазона скоростей ветра.

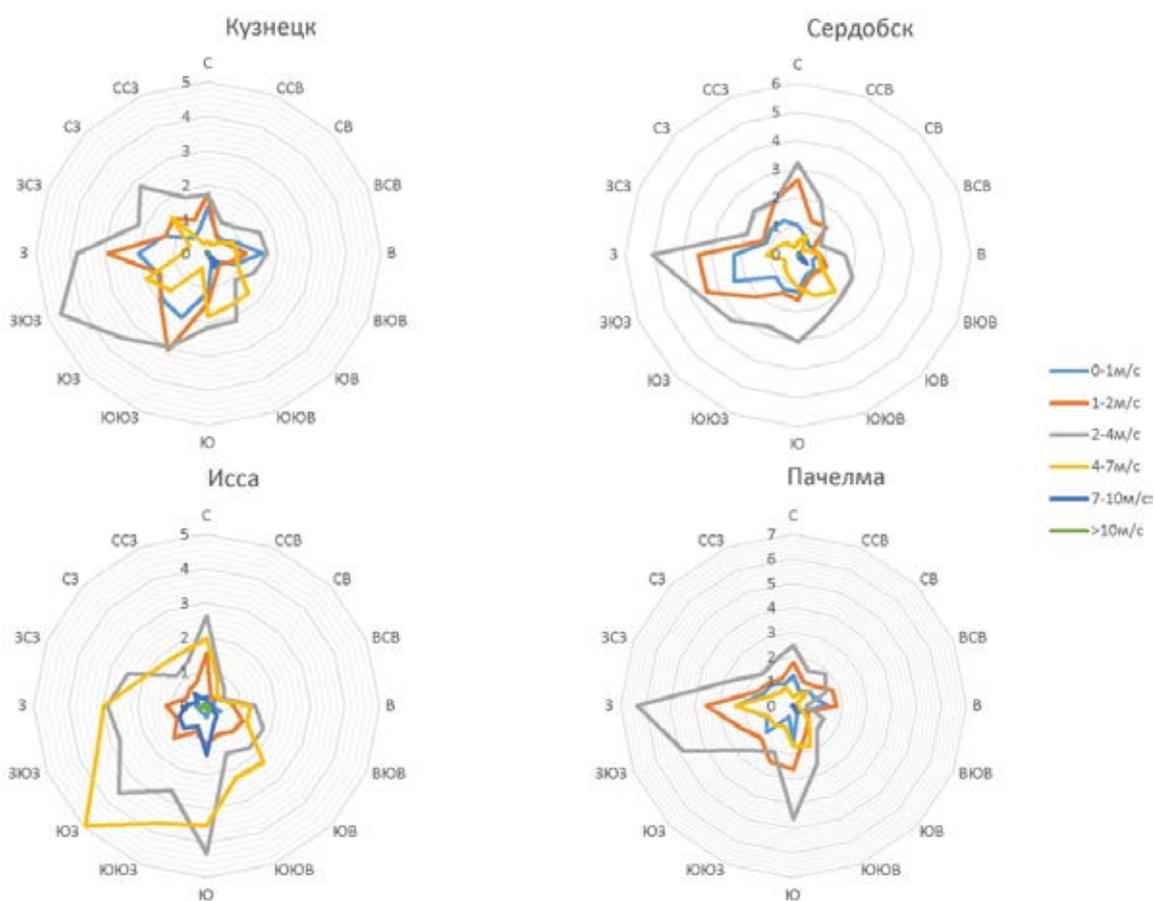


Рис. 5. Ветровые диаграммы в контрольных точках

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость ветра, м/с	Удельная мощность, Вт/м ²	Кузнецк		Сердобск		Пачелма		Исса	
		Доля ветра, %	Пр-во ЭЭ, кВт·ч/год						
0–1	0,046	17,7	0,07	17,65	0,07	16,7	0,07	3,83	0,02
1–2	1,24	21	2,28	26,3	2,86	27,12	2,95	13,92	1,51
2–4	9,92	35,5	30,85	39,5	34,33	39,9	34,67	32,56	28,29
4–7	61,14	15,8	84,62	12,5	66,95	14,6	78,20	34,8	186,38
7–10	225,7	1,06	20,96	0,82	16,21	0,58	11,47	7,25	143,34
>10	367,5	0,034	1,09	0,034	1,09	0	0,00	1,2	38,63
Суммарная выработка э.э. кВт·ч/год			138,78		120,41		127,35		359,55

Анализ приведенных результатов показывает, что ветер на территории Пензенской области дует в среднем 95 % времени. При этом удельная выработка электроэнергии составляет примерно 130 кВт·ч/м² в год и только на севере области – 360 кВт·ч/м². Полученные результаты позволяют оценить экономические показатели при производстве электроэнергии на ветровых турбинах на территории Пензенской области.

Оценка экономической обоснованности использования энергии ветра при генерации электроэнергии в Пензенской области

Для оценки экономических показателей производства электроэнергии на ветровых электростанциях воспользуемся следующим выражением [7]:

$$L_f = \frac{C_{kW} r_f}{W_{гkW}}, \quad (3)$$

где L_f – удельная стоимость производства электроэнергии (руб./кВт·ч); C_{kW} – удельная стоимость электростанции (руб./кВт); r_f – фиксированная ставка в процентах; $W_{гkW}$ – годовая выработка электроэнергии на электростанции на киловатт установленной мощности.

Годовая выработка электроэнергии может быть получена исходя из данных по удельной выработке

$$W_{г} = W_{y} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4)$$

где d – размах лопастей ветровой турбины.

Таким образом, подставляя (4) в выражение (3), получим

$$L_f = \frac{4C_{kW} r_f P}{W_y \pi d^2}. \quad (5)$$

Согласно данным исследований [8] удельная стоимость электростанций C_{kW} колеблется от 600 (Китай) до 2000 \$/кВт (Австрия). Для наших расчетов будем ориентироваться на значение в 1000 \$/кВт. Параметр r_f отражает ежегодные затраты в процентном соотношении к стоимости электростанции, а также различные субсидии. При расчетах параметр r_f будет меняться от 10 до 19 % с шагом 1 %. Также была исследована зависимость стоимости электроэнергии от размаха лопастей турбины. Мощность ветровой турбины принята равной 1 кВт. Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 6.

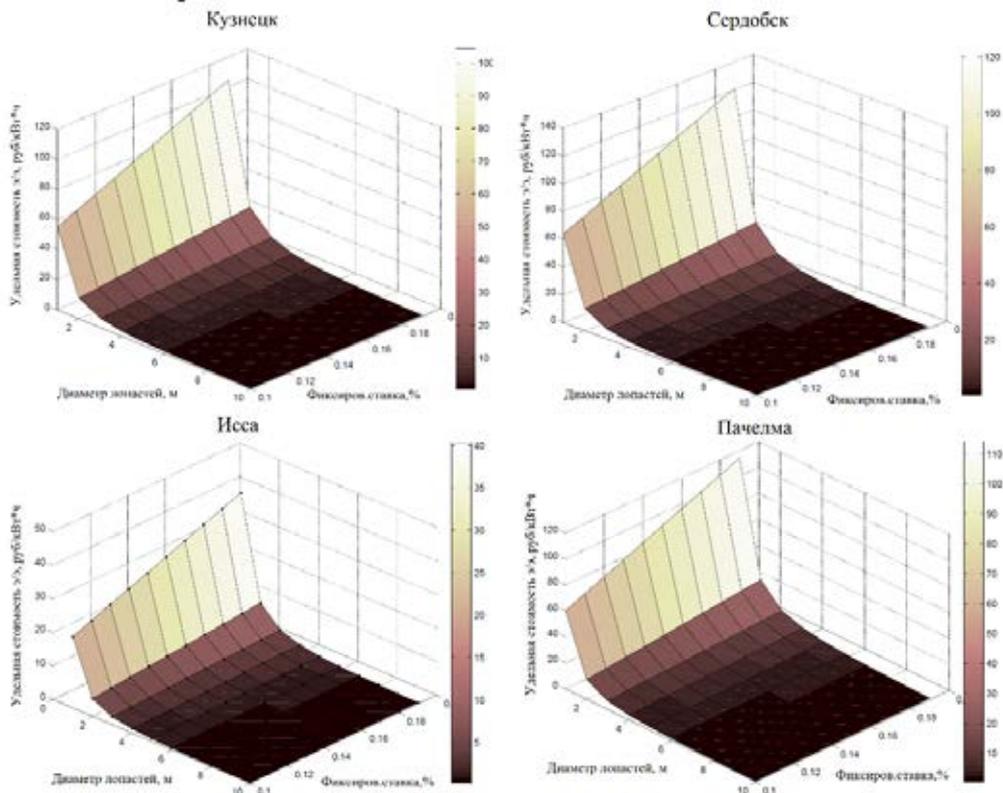


Рис. 6. Графики зависимости удельной стоимости электроэнергии от размаха лопастей турбины и значения фиксированной ставки

Результаты исследований показывают, что на большей части Пензенской области себестоимость электроэнергии составляет от 50 до 140 руб. за кВт·ч для ветровой турбины с размахом лопастей 1 м и от 0,65 до 1,23 руб. за кВт·ч для турбины с размахом лопастей 10 м. При этом следует сказать, что на севере области эти значения составляют от 23 до 44 руб. за кВт·ч и от 0,22 до 0,43 руб. за кВт·ч соответственно. Таким образом, генерация электроэнергии на ветровых турбинах на территории Пензенской области экономически обоснована, но для этого следует адаптировать технологию к применению ветровых турбин с лопастями большего размаха.

Если, к примеру, использовать ветровую турбину типа Enercon E-126 с размахом лопастей 126 м и номинальной мощностью 7500 кВт, рассчитанную на скорость ветра 9 м/с, то на севере области она будет вырабатывать в год 4,6 млн кВт·ч. В течение этого времени она только в 8,45 % случаев будет работать на номинальной скорости ветра. Себестоимость производимой электроэнергии при фиксированной ставке 0,1 составит 11,4 руб/кВт·ч. Для оценки целесообразности применения конкретной ветровой турбины предлагается ввести понятие форм-фактора ветровой турбины, отражающего ее конструктивные особенности. Для этого следует в выражение (5) привести к следующему виду:

$$\frac{W_y \pi d^2}{4P} = \frac{C_{kW} r_f}{L_f} \quad (6)$$

Далее введем следующую замену:

$$\frac{W_y \pi d^2}{4P} = K_f, \quad (7)$$

где K_f – форм-фактор.

Тогда с учетом (7) выражение (6) преобразуется к следующему виду:

$$K_f = \frac{C_{kW} r_f}{L_f} \quad (8)$$

Данное представление выражения (5) позволяет построить графики зависимостей себестоимости производимой электроэнергии от конструктивных особенностей турбины. На рис. 7 приведены зависимости $K_f(L_f)$ для различных C_{kW} .

Также следует отметить, что на основе форм-фактора можно производить оценку экономической эффективности турбины в конкретных условиях и определить основные пути повышения эффективности турбины на основе конструктивных изменений, осуществляемых либо за счет уменьшения мощности единичной установки, либо за счет увеличения размаха лопастей.

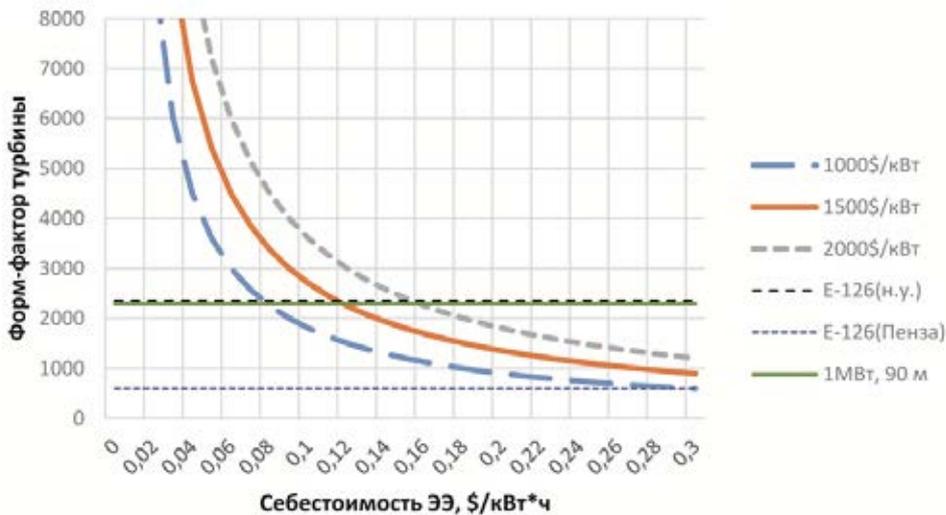


Рис. 7. Графики зависимостей $K_f(L_f)$ для различных значений удельной стоимости

На рис. 7 показано значение форм-фактора для турбины Enercon E-126 при номинальных показателях в условиях Пензенской области, а также для ветровой турбины номинальной мощностью 1 МВт и размахом лопастей 90 м. Как видно из графика, применение турбины типа Enercon E-126 в условиях Пензенской области ведет к понижению значения форм-фактора и росту себестоимости электроэнергии, а применение турбины мощностью 1 МВт с размахом лопастей 90 м практически соответствует применению турбины Enercon E-126 в ее расчетных условиях. При этом увеличение размера строительной части турбины не приведет к значительному удорожанию электроустановки, так как стоимость башни составляет только 10 % в общей стоимости ветровой установки [9]. Также следует отметить, что зарубежные источники [10] ориентируются на себестоимость электроэнергии на ветровых электростанциях на уровне 7,3 центов за 1 кВт·ч, или 4,75 руб. за 1 кВт·ч, что делает конкурентоспособной генерацию энергии на ветровых турбинах без учета господдержки в зонах, не входящих в ОРЭМ, где стоимость электроэнергии колеблется в районе 1 руб. за 1 кВт·ч [11].

Для создания инвестиционной привлекательности проектов, связанных с возобновляемой энергетикой, был принят ряд мер, стимулирующих развитие данного направления. В частности, были приняты правила определения цены на мощность [12], поставляемую на ОРЭМ от возобновляемых источников энергии, учитывающей компенсацию затрат генерирующим компаниям. При этом следует отметить, что в целом механизмы стимулирования генерации электроэнергии на возобновляемых источниках энергии носят непрозрачный характер, а наличие требования к степени локализации генерирующего объекта является сдерживающим фактором на начальном этапе развития ветроэнергетики, который в данный момент переживает Россия [13].

Рассмотренные меры позволяют снизить значения фиксированной ставки r_f . Поэтому также следует рассмотреть влияние экономических параметров на себестоимость электроэнергии, генерируемой на ветровых турбинах.

Если взять значение K_f равным 2300, что соответствует приведенным выше расчетам, то можно рассчитать значения L_f при различных значениях удельной стоимости электростанции и фиксированной ставки, преобразовав выражение (8) к следующему виду:

$$L_f = \frac{C_{kW} r_f}{K_f}. \quad (9)$$

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2

Таблица 2

Себестоимость производства электроэнергии на ветровой турбине, руб./кВт·ч

Удельная стоимость электростанции C_{kW} , \$/кВт	Значение фиксированной ставки r_f , %									
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
500	1,41	1,55	1,69	1,83	1,98	2,11	2,26	2,4	2,54	2,68
1000	2,82	3,1	3,4	3,67	3,95	4,23	4,52	4,8	5,1	5,36
1500	4,24	4,66	5,08	5,51	5,93	6,36	6,78	7,2	7,63	8,05
2000	5,65	6,22	6,78	7,34	7,91	8,47	9,04	9,6	10,1	10,74

В табл. 2 выделены значения себестоимости, которые меньше значений одноставочного тарифа на электроэнергию по Пензенской области на 2016 г.

Удобство представления результатов расчета себестоимости электроэнергии в предложенном виде заключается также в том, что при использовании другого значения форм-фактора турбины нет необходимости производить расчеты заново, а просто умножить значения табл. 2 на коэффициент

$$k = \frac{2300}{K'_f}, \quad (10)$$

где 2300 – исходное значение форм-фактора; K'_f – новое значение форм-фактора.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Пензенский регион является перспективным с точки зрения внедрения технологии генерации электроэнергии на возобновляемых источниках;
- 2) на территории Пензенской области наиболее перспективным является север региона, который подходит для генерации электроэнергии на современных ветровых турбинах;
- 3) при использовании ветровых турбин следует адаптировать их конструкцию к использованию на средних скоростях ветра в диапазоне 4–7 м/с;
- 4) без субсидий применение ветровых турбин на территории Пензенской области ограничено только решением задач локального электроснабжения и не позволяет осуществлять поставку электроэнергии на ОРЭМ.

Список литературы

1. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley. – Cambridge, United Kingdom ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.
2. Отчеты в рамках РКИК. – URL: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8108.php (дата обращения: 09.02.2016).
3. Key world energy statistics. International energy agency. – France : Chirat, 2015 – 81 p.
4. IPCC, 2011 Summary for Policymakers / ed. by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schloemer, C. von Stechow // IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. – Cambridge, United Kingdom ; New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2012. – 246 p.
5. Сайт системного оператора Единой энергетической системы. – URL: http://so-ups.ru/?id=rdu_penza (дата обращения: 09.02.2016).
6. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / под ред. П. П. Безруких. – М. : ИАЦ Энергия, 2007. – 272 с.
7. Johnson, G. L. Wind energy systems / G. L. Johnson. – Manhattan, KS, 2001 – 384 p.
8. D. Gielen Renewable energy technologies: cost analysis series. Vol. 1: Power Sector. Iss. 5/5: Wind Power. – IRENA. – June 2012. – 64 p.
9. Patel, M. R. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation / Mukund R. Patel. – 2nd ed. – CRC Press, 2006. – 448 p.
10. 2013 Cost of Wind Energy. Review / C. Moné, A. Smith, B. Maples, M. Hand. – USA: National Renewable Energy Laboratory, 2015. – 74 p.
11. Сайт администратора торговой системы оптового рынка электроэнергии. – URL: www.atsenergo.ru/results/rsv/hubs_extra/hubs_extra2/index.htm (дата обращения: 09.02.2016).
12. Постановление Правительства от 28.05.2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». – URL: <http://base.garant.ru/70388616/>
13. Елистратов, В. В. Развитие ветроэнергетики Украины и ее состояние в России / В. В. Елистратов, А. Е. Конеченков, Г. Б. Шмидт // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – №3. – С. 101–109.

Елинов Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технического сервиса и электроэнергетики,
Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет) Пензенский филиал
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail: edorm86a@gmail.com

Бирюкова Ольга Вячеславовна

старший преподаватель,
Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет) Пензенский филиал
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail:mgutu_tsie@mail.ru

Elinov Dmitry Aleksandrovich

candidate of technical science, associate professor,
sub-department of technical service and electricity,
Moscow State University of Technology
and management named after K. G. Razumovsky –
Penza branch
(440026, 6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Biryukova Olga Vyacheslavovna

lecturer,
Moscow State University of Technology
and management named after K. G. Razumovsky –
Penza branch
(440026, 6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Долотин Алексей Иванович

кандидат технических наук,
заведующий кафедрой технического сервиса
и электроэнергетики,
Московский государственный университет
технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет) Пензенский филиал
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6)
E-mail:mgutu_tsie@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено экологическое воздействие энергетики на окружающую среду по выбросам углекислого газа при генерации электроэнергии. Приведена структура генерации на территории Пензенской области, а также обосновывается целесообразность развития генерации на возобновляемых источниках энергии. Проанализирована ветровая обстановка на территории Пензенской области в разных точках, даны рекомендации по применению ветровых турбин. Приведены результаты анализа экономической эффективности применения ветровых турбин для генерации электроэнергии на территории Пензенской области в зависимости от конструктивных особенностей, а также от изменения экономических факторов.

Ключевые слова: ветровая турбина, генерация, электроэнергия, возобновляемые источники энергии, себестоимость электроэнергии.

Dolotin Aleksey Ivanovich

candidate of technical science,
head of sub-department of technical service and
electricity,
Moscow State University of Technology
and management named after K. G. Razumovsky –
Penza branch
(440026, 6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Abstract. The paper considers the environmental impact of energy on the environment by carbon dioxide emissions from electricity generation. The article describes the structure of the generation in the Penza region, as well as the expediency of generating renewable energy. In the article have been analyzed the wind situation on the territory of the Penza region at different points, given the recommendations on the use of wind turbines. The paper described results of the analysis of economic efficiency of wind turbines for electricity generation in the Penza region, depending on the design features, as well as from changes in economic factors.

Key words: wind turbine, generation, electricity, renewable energy, the cost of electricity.

УДК 620.92

Елинов, Д. А.

Оценка возможности применения ветровых турбин для генерации электроэнергии на территории Пензенской области / Д. А. Елинов, О. В. Бирюкова, А. И. Долотин // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 97–105. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-14.

ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БОРТОВЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

А. А. Тюгашев

Введение

Современный космический аппарат (КА) представляет собой, можно сказать, «классический» пример сложного технического комплекса (СТК). Сложность здесь подразумевает два важных аспекта. Первый – значительное число входящих в состав комплекса компонент, связанных между собой множеством связей различной природы. Действительно, КА включает целый ряд подсистем – систему автономной навигации, систему терморегулирования, систему энергоснабжения, систему телеметрических измерений, целевую аппаратуру. Каждая из систем, в свою очередь, состоит из множества приборов, агрегатов, датчиков. Всего на борту насчитываются сотни устройств, имеющих большое число параметров, режимов работы, воспринимаемых команд. Второй аспект сложности подразумевает сложное поведение, которое трудно предсказать заранее [1], а описать аналитически – практически невозможно. Неудивительно, что в реальных космических полетах происходят отказы, вызываемые различными причинами, среди которых – аппаратные сбои и ошибки в программном обеспечении.

При этом, учитывая трудоемкость и стоимость создания, для ракетно-космической техники важнейшей характеристикой является надежность. Надежность является комплексной характеристикой, включающей в том числе свойства устойчивости и восстанавливаемости, которые могут также рассматриваться как составляющие живучести – свойства более широкого, подразумевающего способность выполнения целевой задачи при наличии неблагоприятных факторов и в ненормированных условиях функционирования [2]. Отказоустойчивость подразумевает, что КА может адаптироваться к ненормативным условиям и (возможно, с некоторым снижением качества) продолжить выполнение возложенных на него задач в непредвиденных условиях и при воздействии аномальных факторов. Восстанавливаемость означает способность КА вернуться в работоспособное состояние после сбоя или аварии путем, например, реконфигурации бортовых средств, подключения резервных комплектов бортовой аппаратуры и пр.

Для традиционных машин и механизмов, эксплуатируемых на Земле, восстановление работоспособности обычно подразумевает диагностику и ремонт, проводимые человеком. Ремонт автоматического космического аппарата, находящегося на орбите, как правило, невозможен (известны лишь уникальные случаи, как с космическим телескопом «Хаббл», ремонт которого осуществляли экипажи корабля «Спейс Шаттл»). Рассчитывать приходится лишь на структурную или функциональную избыточность имеющегося на борту оборудования и программные средства.

В течение всего срока активного существования (САС) необходимо решать задачу определения множества управляющих воздействий, необходимых для поддержания требуемой для реализации конкретной бортовой функции конфигурации бортовых средств. При этом обязательным является парирование отказа единичного устройства без потери качества или функциональности. В случае диагностики отказа происходит реконфигурация аппаратуры с использованием «горячего» или «холодного» резерва либо перевод КА в один из специальных «безопасных» режимов, в которых развитие аварийной ситуации, способное привести к катастрофической потере работоспособности, исключается.

Важнейшая роль в обеспечении живучести КА возлагается на бортовое программное обеспечение, выполняющее функции контроля и диагностики, а в случае необходимости – управления в нештатной ситуации (при управлении КА для этого может использоваться специальный «паттерн» управления или режим работы КА в случае возникновения неисправностей [2]).

При разработке алгоритмов контроля и диагностики на основе инженерного анализа бортовой аппаратуры (БА) с учетом имеющихся резервов и предшествующего накопленного опыта

эксплуатации выявляется список критических отказов и формируется оценка их важности, разрабатываются диаграммы состояния и временные циклограммы режимов управления [2, 3]. Известны ситуации, когда работоспособность КА в целом (хотя и с некоторым снижением качества) восстанавливается путем использования того или иного бортового оборудования для решения изначально не планировавшихся задач (например, после отказа гироскопических датчиков-измерителей перевод системы стабилизации на использование в качестве основного источника информации звездных датчиков). Достижение этого требует переработки бортовых алгоритмов и программ и загрузки измененного ПО на борт [2].

Традиционным и широко применяемым до сих пор является метод командного телеуправления, который реализуется с привлечением наземного комплекса управления (НКУ) для анализа состояния КА, выработки решений о выдаче соответствующей совокупности управляющих воздействий и выдачи на борт управляющих воздействий в реальном времени [4]. В этом случае в течение всего срока активного существования КА с ним непрерывно должен работать наземный комплекс управления (НКУ). Данный комплекс включает станцию приема телеметрической информации и выдачи на борт командно-программной информации, линии связи этой станции с центром управления полетом (ЦУП), средства ЦУПа по обработке и представлению телеметрической информации, по формированию и выдаче командно-программной информации. Постоянно в состоянии полной готовности должен находиться персонал, отлично владеющий эксплуатационной документацией и способный оперативно и ответственно принимать решения о выдаче команд на борт. Но в этом случае речь может идти о реакции на изменение ситуации на борту не ранее, нежели через несколько минут. Возможно улучшение качества управления за счет, например, интеллектуальной поддержки процессов принятия решения оператором, в том числе с использованием баз знаний. Но потери времени на обмен между КА и Землей, постоянные затраты на поддержание непрерывной работы средств НКУ органически присущи данному методу. В некоторых случаях подключение персонала НКУ вообще не представляется возможным ввиду особенностей орбит КА (например, для низкоорбитальных спутников Земли с коротким интервалом видимости с каждого из наземных пунктов, или автоматических межпланетных станций с длительным временем прохождения радиосигнала), что при быстром развитии аномальной ситуации на борту делает последующее вмешательство с Земли уже бесполезным.

Кардинальным решением проблемы является максимальная степень реализации концепции автономного управления. Данный подход подразумевает перенос принятия решений на бортовые средства с оставлением за НКУ только постановки общих задач и целей функционирования и последующего контроля.

Для случая автоматических (беспилотных) КА средства автономного управления приобретают важнейшее значение, обеспечивая сохранение работоспособности и выполнение поставленных перед КА задач без участия человека. Эффективность автономного управления зависит от полноты и корректности хранящихся на борту необходимых для принятия решений знаний и от характеристик механизма принятия решений в условиях ограниченных бортовых вычислительных ресурсов.

Традиционно логика управления КА, в том числе в случае возникновения нештатных ситуаций, жестко «зашията» в код управляющих программ [4, 5]. Однако известны и более гибкие подходы к решению проблемы.

Весьма интересен опыт развивавшейся в СССР с конца 60-х годов школы ситуационного управления (Д. А. Поспелов, Ю. И. Клыков, Л. С. Загадская и др.) [6]. Подход использовался для решения задач управления, когда другие методы не давали решения. В ситуационных моделях использовались знания об объекте управления и методах управления им, а также применялись такие традиционные для ИИ приемы, как описание ситуаций, складывающихся на объекте управления на ограниченном и формализованном естественном языке, использование псевдофизических логик для оценки и преобразования ситуаций, обучение при накоплении информации в памяти системы, планирование целесообразных действий по управлению и использованию информации от технологов и управленцев.

Бортовые базы знаний как средство обеспечения живучести

Значительный опыт имеется в данной проблемной области у ОАО «Информационные спутниковые системы», г. Железногорск. На борту создаваемых ими аппаратов в составе БПО присут-

ствуют специальные интерпретаторы правил [4, 7], фактически являющиеся упрощенным аналогом машины вывода классической экспертной системы.

Специализированный интерпретатор правил «Дежурный контроль и диагностика» (ДКД), называемый в терминологии Заказчика также «макропрограммой», предназначен для обнаружения и парирования возникающих на борту КА отказов. Разработка правил осуществляется непосредственно специалистами по системам КА с помощью специально созданного проблемно-ориентированного языка. Система формирования правил обеспечивает таблично-ориентированный ввод. После чего происходит преобразование правил в бортовые структуры данных. Правила для интерпретатора ДКД организованы в виде совокупности матриц векторов состояний и связанных с ними последовательностей управляющих действий [7, 8].

Большая часть работы по верификации правил осуществляется на наземном комплексе отладки (НКО). Основу НКО составляет программный имитатор КА, включающий в себя программные модели всего бортового оборудования и штатное бортовое программное обеспечение, работающее в среде программной модели бортового вычислительного комплекса [7]. К моменту готовности КА к запуску количество правил автономного принятия решений достигает нескольких сотен. В процессе эксплуатации это количество обычно увеличивается еще на 20–30 % [4, 7]. Возможность разработки новых правил специалистами по бортовым системам без привлечения программистов делает средства автономного управления эффективным средством «ремонта» и улучшения характеристик КА в течение всего срока активного существования.

Как известно, база знаний обычно входит в состав экспертной системы и представляет собой набор структурированных знаний, часто в форме «ЕСЛИ ... ТО...», описывающих, например, способ вывода некоего заключения на основе имеющихся посылок [9, 10].

Классическая структура подразумевает следующие компоненты:

- 1) база знаний;
- 2) человеко-машинный интерфейс (диалоговый компонент);
- 3) машина вывода («решатель»);
- 4) средства приобретения знаний (компонент приобретения знаний);
- 5) подсистема объяснения (объяснительный компонент).

В структуре экспертной системы может также присутствовать база данных. Для случая бортовой базы знаний в базе данных накапливаются статические и динамические параметры, описывающие параметры аппарата, орбиты и пр. Постоянная часть содержит статические данные о КА и других КА группировки, решающих совместно целевую задачу. Переменная часть содержит данные, которые меняются в процессе полета, – координаты, скорости, угловое положение КА и других КА [2, 3]. В силу ограниченности бортовых вычислительных ресурсов база должна быть очень компактной.

Обозначим $L = \{\alpha_i\}$ – множество условий (относящихся к значениям контролируемых телеметрических параметров), отображающих ситуацию на борту КА. Из элементов множества L можно сформировать вектор текущего состояния (ВТС) КА. Некоторые векторы будут соответствовать штатным ситуациям, некоторые – аномальным.

$F = \{f_j\} = K \cup P$ – множество действий, включающее в себя K – множество команд управления (КУ) бортовой аппаратурой (БА), P – специальных бортовых программ, включенных в паттерн обеспечения живучести.

Правило бортовой базы знаний, направленной на обеспечение живучести КА, может выглядеть в таком случае как отображение $L \rightarrow F$.

Можно разделить бортовую базу знаний на две части. Первая содержит правила установления наличия той или иной нештатной (аномальной) ситуации.

Вторая – правила выхода из данной ситуации, которые могут оперативно пополняться и меняться специалистами с Земли по радиоканалу.

В первой части правило имеет вид $L \rightarrow A$. Во второй $A \rightarrow F$ или более точно $A \times T \rightarrow F \times T$, где T – множество моментов бортовой шкалы времени, поскольку может иметь значение время проверки тех или иных условий, а выдача управляющего воздействия для восстановления работоспособности КА – представлять собой не единичный акт, а циклограмму, реализующую набор операций, взаимоувязанных по времени, например:

$$[(\alpha_5, \alpha_3, \neg\alpha_1), 0] \rightarrow \langle f_1, 0 \rangle, \langle f_2, 100 \rangle, \langle f_3, 260 \rangle,$$

где $0,100,260$ – моменты времени t_i выполнения необходимых действий. Отметим, что некоторые действия могут быть связаны при этом с формированием условий, входящих в L (приданием им значений истинности или ложности).

Таким образом, в сравнении с традиционными правилами вывода базы знаний, в которых фигурируют в обеих частях предикаты (условия), например $\alpha_1 : \alpha_2, \alpha_3, \alpha_5$, означает, что при истинности α_2, α_3 и α_5 истинным нужно считать и α_1 , мы можем сказать, что аналогом правой части будет являться логический вектор (вектор текущего состояния), а левой части – как предикат, который необходимо считать истинным в данном случае, так и набор привязанных к моментам времени определенных действий.

В широком смысле упомянутый набор операций может включать алгоритмы реакции на нештатные ситуации, диагностики систем, алгоритмы принятия решений, перехода в случае необходимости в заранее предусмотренные устойчивые состояния.

Формализация, структуризация и использование правил по управлению КА может рассматриваться как неотъемлемая часть технологии информационной поддержки изделия (CALS-технологии) [5].

Отметим, что в описанных бортовых средствах не происходит самостоятельного порождения новых знаний, новых правил, что делает весьма актуальной проблему создания и развития средств приобретения знаний по управлению живучестью КА.

При этом, как известно, весьма важной проблемой при использовании любых баз знаний является их наполнение [6, 9, 10]. Нередка ситуация, когда эксперт – носитель необходимых знаний, не являющийся математиком или специалистом в области информационных технологий, испытывает затруднения при формализованном их представлении, необходимом для внесения в машину. Еще одной существенной проблемой является обеспечение таких свойств, как непротиворечивость и целостность вносимых в базу знаний. Посредником здесь может выступать специалист – инженер по знаниям, однако в подобном случае нельзя полностью исключить возникновения эффекта «испорченного телефона».

Между людьми – участниками процесса – могут возникать недопонимание, использование различных систем понятий и пр. С целью разрешения данного противоречия используются различные подходы, например, использование диалоговых подсистем, взаимодействующих с пользователем на естественном языке (ЕЯ) или некоем подмножестве ЕЯ (язык «деловой прозы» [6] и пр.). Система может даже «уметь» задавать пользователю уточняющие вопросы. Однако даже диалоговый режим с последовательным уточнением не может полностью исключить неточности и ошибки в силу таких особенностей ЕЯ, как неточность и многозначность.

Средства визуализации и графического конструирования правил бортовой базы знаний

Говоря о знаниях и интеллектуальных системах вообще, имеет смысл обратить внимание на графическую форму представления информации [11, 12]. Человек привык жить в материальном мире, ему довольно трудно разбираться с «виртуальными», информационными объектами, коими по своей сути являются программы. При этом одной из наиболее естественных форм представления (восприятия) информации для человека является графический образ. К этой форме человек прибегает всякий раз (возможно неявно для себя), когда необходимо решать действительно сложные задачи. Человеческая культура «визуально ориентирована», достаточно упомянуть фотографии, кинофильмы, телевидение, презентации. В качестве типичных эпитетов для графического представления используются «дружественный», «интуитивный», «простой», «привлекательный», «понятный», «запоминающийся» и пр. Графика позволяет использовать метафору – представление новых или необычных для пользователя явлений через другие явления, хорошо ему известные из повседневной жизни [9]. Можно отметить удачное соответствие графики требованиям этапов постановки задачи и проектирования. Использование визуального представления позволяет создавать более компактные и наглядные спецификации. Упрощается понимание в процессе взаимодействия инженеров-системщиков, математиков и пр. Преимущества визуального представления за счет улучшения координации и взаимопонимания участников работ дают возможность повышения производительности труда.

В настоящее время под руководством автора по заказу АО «ИСС» проводятся опытно-конструкторские работы по созданию СИПР МП – системы интеллектуальной поддержки процес-

сов проектирования и верификации макропрограмм интегрального управления. Разрабатываемое инструментальное программное обеспечение, должно по требованиям технического задания «без швов» интегрироваться с существующими форматами и программным обеспечением. Необходимо обеспечить возможность визуализации структуры ранее созданных с применением использованных ранее представлений и инструментов правил; изменения (графического редактирования) существующих правил с адекватным отражением всех изменений в имеющейся бортовой базе правил формата Заказчика; конструирования в специальном программном средстве новых правил «с нуля».

На данный момент (стадия опытного образца) был создан инструмент, позволяющий визуализировать и конструировать макропрограммы дежурного контроля и диагностики, выполняемые на борту периодически и контролирующие текущие параметры объекта с целью выявления сигнатур аномальных ситуаций (АС).

Визуальное представление позволяет с использованием специально разработанной совместно с заказчиками нотации представлять правила базы знаний. Представление позволяет ментально (симультанно) увидеть суть посылок и заключений. Разработан редактор, с помощью которого можно отображать в наглядной эргономичной форме правила базы знаний (рис. 1).

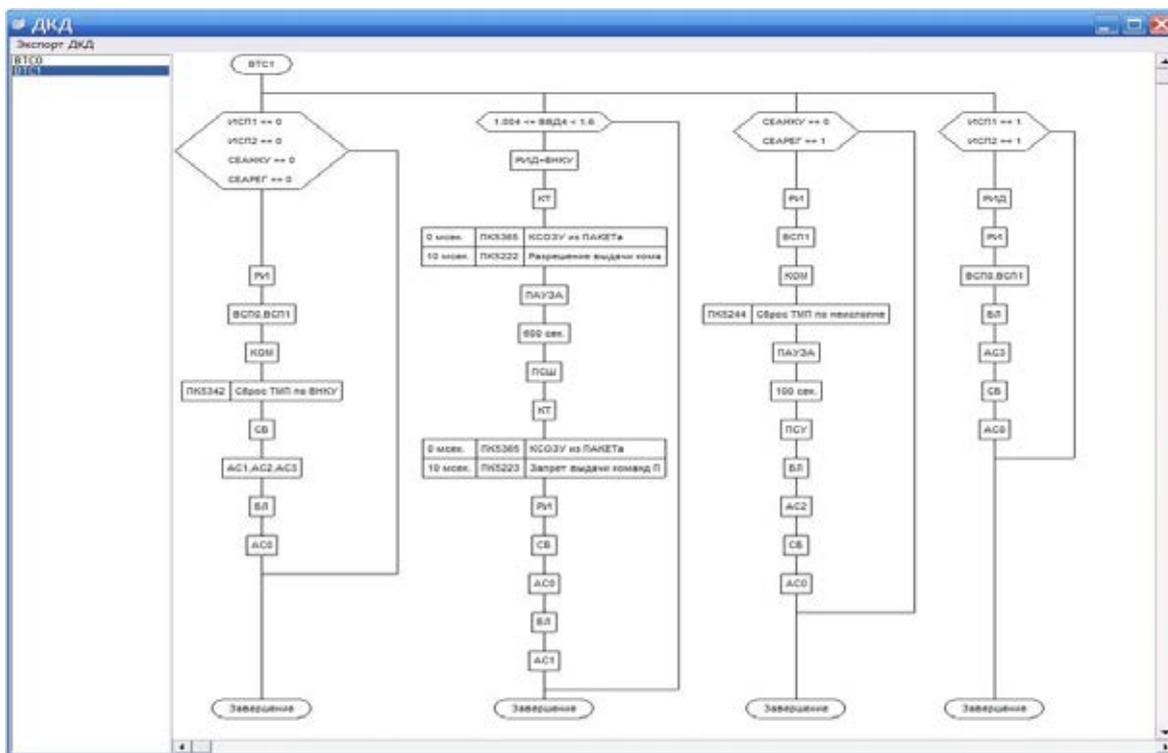


Рис. 1. Экран средств визуализации и графического конструирования правил

Исходно нотация основана на классических блок-схемах алгоритмов и программ, однако во многом учтены идеи В. Д. Паронджанова [12], обеспечивающие наглядность, ясность быстроту и целостность восприятия схем. В частности, пересечения линий строго запрещены. При использовании графического примитива, соответствующего условию, ветвь «Да» всегда идет по вертикали вниз, «Нет» – направо. Самый «наихудший» или «редкий» случай отображается как можно правее. Макропрограмма представляет собой группу правил, отображаемую неким аналогом схемы «силуэт» Паронджанова. «Силуэт» состоит из вертикальных ветвей. В каждой ветви при использовании разработанной совместно с представителями Заказчика визуальной нотации фигурирует одно условие (имеющее как правило сложный характер и соответствующее частному вектору состояния СТК), в случае истинности которого выполняются расположенные ниже действия.

В связи с тем, что в структуре макропрограмм существуют команды для перехода к анализу другого правила, был также разработан визуализатор связей. Макропрограмма представляется графом, в котором множество ребер отражает связи между группами правил (рис. 2).

10. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб. : Питер, 2001. – 384 с.
11. Тюгашев, А. А. Графические языки программирования и их применение в системах управления реального времени / А. А. Тюгашев. – Самара : Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2009 – 159 с.
12. Паронджанов, В. Д. Дружелюбные алгоритмы, понятные каждому / В. Д. Паронджанов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

Тюгашев Андрей Александрович

доктор технических наук, доцент, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой прикладной математики и информатики и информационных систем, Самарский государственный университет путей сообщения (443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В) E-mail: tau797@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проблема отказов в космических полетах остается одной из наиболее важных и сложных. Важнейшую роль в обеспечении отказоустойчивости играют бортовые программные средства автономного управления. *Материалы и методы.* В отличие от прямого кодирования правил управления в случае возникновения неисправностей в коде бортового программного обеспечения намного более гибким и экономным является подход на основе интеллектуальных средств, например, бортовых интерпретаторов правил реального времени. Правила при этом могут быть в оперативном режиме изменены по радиоканалу с Земли. Существенно, что правила могут быть заданы проектантами и другими специалистами, не являющимися профессиональными программистами. Предложено применение для этого интуитивно понятной визуальной нотации. *Результаты.* Разработан визуальный язык для эргономичного представления правил бортовых интеллектуальных средств автономного управления. Созданные инструментальные средства позволяют визуализировать ранее построенные правила управления, а также строить новые в графическом конструкторе. Ведется работа над средствами автоматизации верификации правил и средствами автоматизации документирования. *Выводы.* Эргономичное представление правил позволяет улучшить взаимопонимание в коллективе разработчиков правил, сократить число неточностей и ошибок, за счет чего в конечном счете – повысить надежность космических миссий.

Ключевые слова: информационно-управляющий комплекс, наземно-космическая информационная сеть, оперативность обмена информацией, межспутниковые радиолинии, ретрансляторы.

Tyugashev Andrey Aleksandrovich

doctor of technical sciences, associate professor, professor, acting head of sub-department of applied mathematics and informatics and information systems, Samara State Transport University (443066, 2V Svobody street, Samara, Russia)

Abstract. *Background.* The problem of dependability remains one of the most important in modern space missions. The onboard autonomous control software plays a key role in Fault Tolerance. *Materials and methods.* In contrast to rigid method when control logic is to be implemented in program source code, we utilize onboard intelligent real-time interpreter of rules. Rules for autonomous control in contingencies can be operatively uploaded and updated from the Earth by radio. The main idea of the proposed method is integration of onboard intelligent software with the power of visual representation. *Results.* The Visual Domain Specific Language for ergonomic representation of the rules of onboard intelligent autonomous control programs has been designed. The easy-to-understand form allows reducing influence of human factor. The non-programmer can specify and refine rules using specially developed Toolset. Future works include development of rules verification tool and automated documentation generation tool. *Conclusions.* The ergonomic representation of the rules allows decreasing of misunderstanding in project team and reducing the number of inaccuracies and errors. Eventually, one can improve the dependability of Space Missions.

Key words: information and control complex, a land-space information network, efficiency of information interchange, inter-satellite radio, repeaters.

УДК 629.7

Тюгашев, А. А.

Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств / А. А. Тюгашев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 106–112. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-15.

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ АВТОНОМНЫХ АППАРАТОВ

Х. А. Абдулкадим, К. К. Васильев, В. Е. Дементьев

Введение

Оценивание траектории объекта в реальном времени среды является сложной задачей, актуальной для различных практических приложений компьютерного зрения. Эта траектория может быть описана алгебраическим или геометрическим образом как изменение положений аппарата с течением времени. Эти положения в различные моменты времени могут регистрироваться различными цифровыми устройствами, отличающимися друг от друга характеристиками точности фиксируемых изображений, их размером, спектральными характеристиками и т.д. Значительное увеличение характеристик регистрирующих устройств, справедливое для последних лет, дает основания для успешного решения различных прикладных задач, в том числе задач, связанных с навигацией и управлением автономным аппаратом [1–4]. В данной статье представлены некоторые результаты исследования оценки траектории по результатам обработки последовательности изображений, полученных с помощью пространственных дальномеров. Характерным примером такого дальномера является распространенный на рынке контроллер Microsoft Kinect.

Применение псевдоградиентных алгоритмов для оценки траектории

Последовательности данных, получаемые от дальномера Kinect, представляют собой двумерные массивы размером 320×240 , содержащие информацию о расстоянии до соответствующих объектов [5]. Эти данные обычно представляются изображениями, каждый цвет пикселя которого является расстоянием между аппаратом и объектом. Использование множеств подобных расстояний позволяет вычислить позицию аппарата относительно объектов. Рассмотрим Z^1, Z^2 – два кадра с инфракрасного дальномера, полученные в следующие друг за другом промежутки времени. Оценка разницы между этими кадрами в виде вектора, состоящего из параметров смещений, масштаба и угла поворота потенциально позволяет определить перемещение самого аппарата [6–8]. Непосредственную оценку вектора параметров деформаций произведем с помощью псевдоградиентных алгоритмов [6] следующим образом:

$$Z^2 = f(Z^1, \Delta x, \Delta y, \Delta M, \Delta \theta), \quad (1)$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta M, \Delta \theta$ – смещение по горизонтали (x), смещение по вертикали (y), угол поворота (θ) и масштаб (M). Для решения задачи позиционирования аппарата по данным инфракрасного дальномера будем считать для определенности, что этот дальномер направлен вперед вдоль оси аппарата, а перемещение аппарата происходит с достаточно малой скоростью, так что разница между получаемыми кадрами изображений достаточно мала.

Анализ алгоритмов оценки траектории

Будем считать, что наблюдаемые объекты находятся в одной плоскости с аппаратом, как показано на рис. 1–6, а оценка расстояния $\rho^{(t+1)}$ от аппарата до центра объекта ($i + \Delta x, j + \Delta y$) является функцией, зависящей от величины $\rho^{(t)}$, полученной в предыдущий момент времени и оценки масштаба в паре изображений, полученных в моменты времени t и $t + 1$:

$$\rho_{(i+\Delta x, j+\Delta y)}^{(t+1)} = \frac{\rho_{(i, j)}^{(t)}}{\operatorname{argmax}(\min)_{\Delta M} M^t}, \quad (2)$$

где $t = 0, 1, 2, 3 \dots$, i, j – координаты центра объекта. Если масштаб близок к единице, т.е. ($\Delta M \cong 0$), то можно считать, что камера не перемещается. В случае, когда известен горизонтальный угол обзора самого дальномера (например, этот угол равен ∞), то горизонтальное угловое разрешение устройства H составляет

$$H = \frac{\text{горизонтальный угол обзора}(\infty)}{\text{Горизонтальное разрешение изображения в пикселях}(\rho)}, \quad (3)$$

где H помогает оценить два других углов. Первый угол является углом поворота, а второй угол является углом отклонения объекта относительно камеры, а именно: угол положения объекта (ϑ).

В случае оценки угла положения второго объекта (ϑ) считаем расстояния в пикселях (\bar{X}) между центром изображения, т.е. центр объекта позиционированный напротив камеры, и центром второго объекта, то

$$\vartheta = \bar{X} \cdot H = \bar{X} \cdot \frac{\infty}{X_{\max}}. \quad (4)$$

Чтобы оценить расстояния ($\rho^{(t+1)}$) между камерой и центром второго объекта, выполним следующее выражение:

$$\rho^{(t+1)} = \frac{\rho^{(t)}}{\cos \vartheta}. \quad (5)$$

Вместе с тем выражение (4) поможет в оценке расстояния между камерой и любым объектом, кроме тех, что расположены в центре (т.е. $\vartheta = 0$). В случае $\vartheta = 0$ геометрическая форма показана на рис. 1,б, считаем, что в центре зрения (т.е. в центре изображения) не существует объекта, а два объекта на обеих сторонах центра – вдоль одной оси. Также каждый объект имеет (ϑ_n) и дифференцированную яркость, поэтому в этих условиях для оценки траектории аппарата относительно каждого объекта выполним

$$\rho_{(i+\Delta x, j+\Delta y)}^{(t+1)} = \frac{\rho_{i,j}^t}{\arg \max(\min)_{\Delta M} M^t} + \cos \vartheta^{(n)}, \quad (6)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ представляет собой порядок объекта в зрении. Важное замечание о том, что выражение (6) используется только в начале работы устройства (т.е. перед оценкой), а затем выполняется выражение (2).

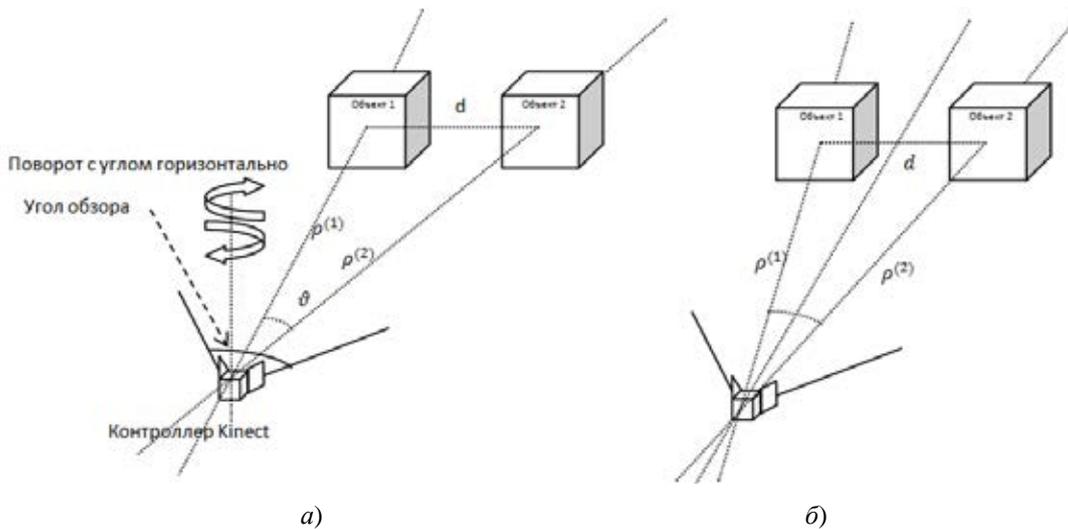


Рис. 1. Варианты размещения двух объектов в поле зрения дальномера

Показанная на рисунке ρ оценивается следующим образом:

$$\rho^{(t+2)} = \frac{\rho^{(t+1)}}{\cos(\vartheta^{(t+2)})} = \frac{\rho^{(t)}}{\cos(\vartheta^{(t+1)} + \vartheta^{(t+2)})}. \quad (7)$$

На рис. 2 представлены результаты оценивания траектории движения аппарата в первом случае (см. рис. 1,а). Первая и третья кривая являются реальной траекторией перемещения аппарата. Вторая и четвертая кривая соответствуют наилучшей оценке траектории по результатам обработки изображений первого и второго объектов соответственно.

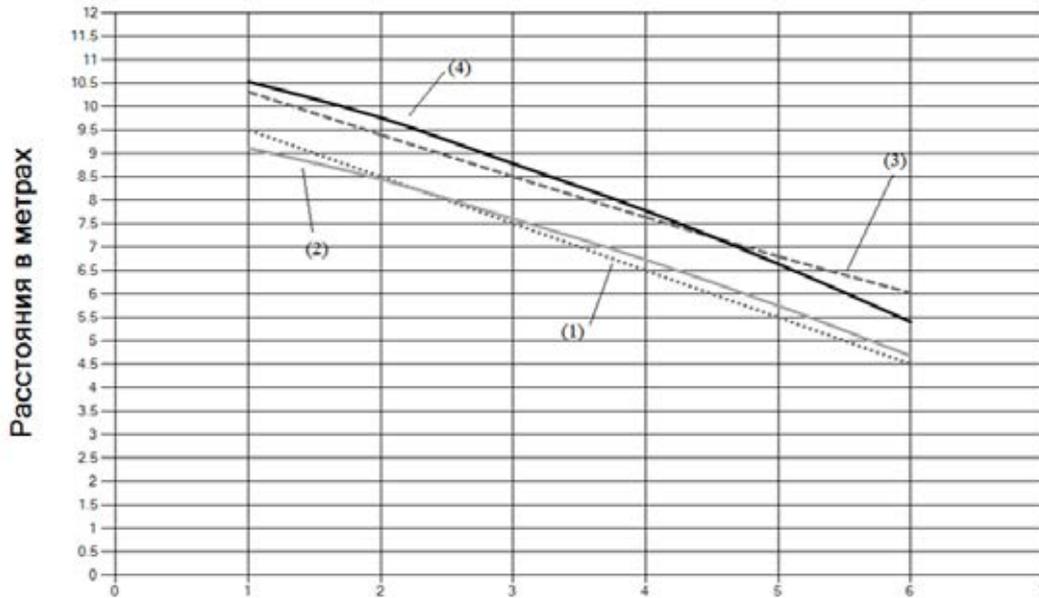


Рис. 2. Оценка траектории аппарата

На рис. 3 представлены абсолютные разницы между реальной траекторией и ее оценками для каждого объекта отдельно.

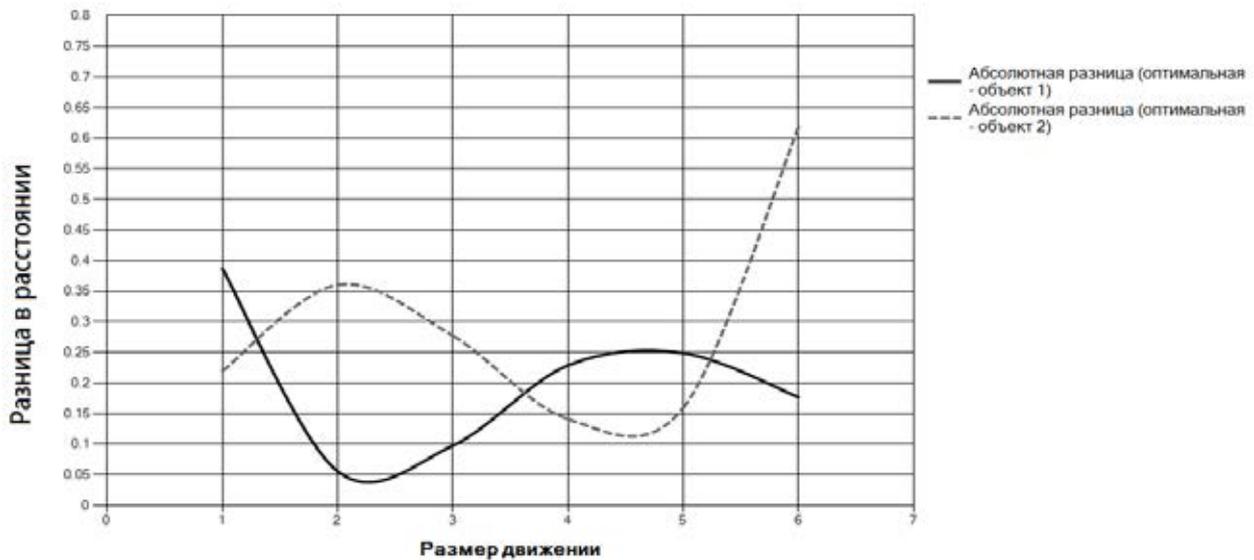


Рис. 3. Абсолютные разницы в расстоянии между траекториями для рис. 1,а

На рис. 4 представлены результаты оценивания траектории движения аппарата во втором случае (см. рис. 1,б).

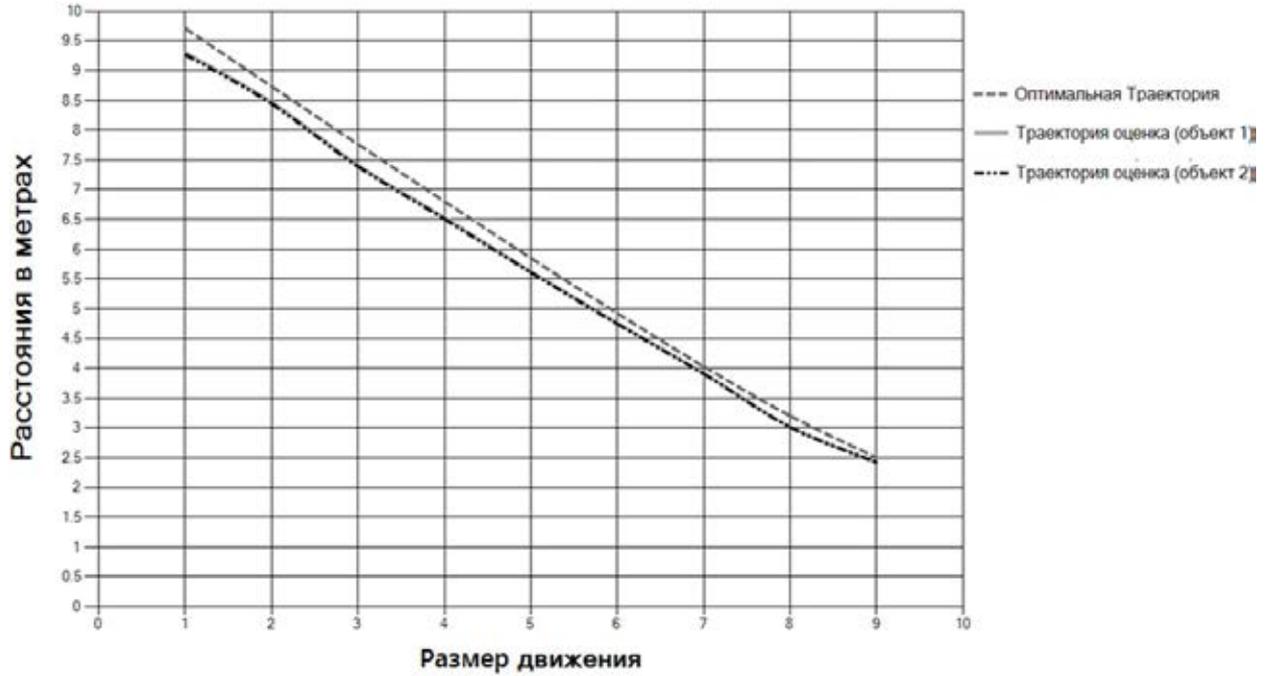


Рис. 4. Оценки траектории аппарата вперед-назад, связанные с двумя объектами во втором случае

На рис. 5 представлены абсолютные различия между реальной траекторией и ее оценками.

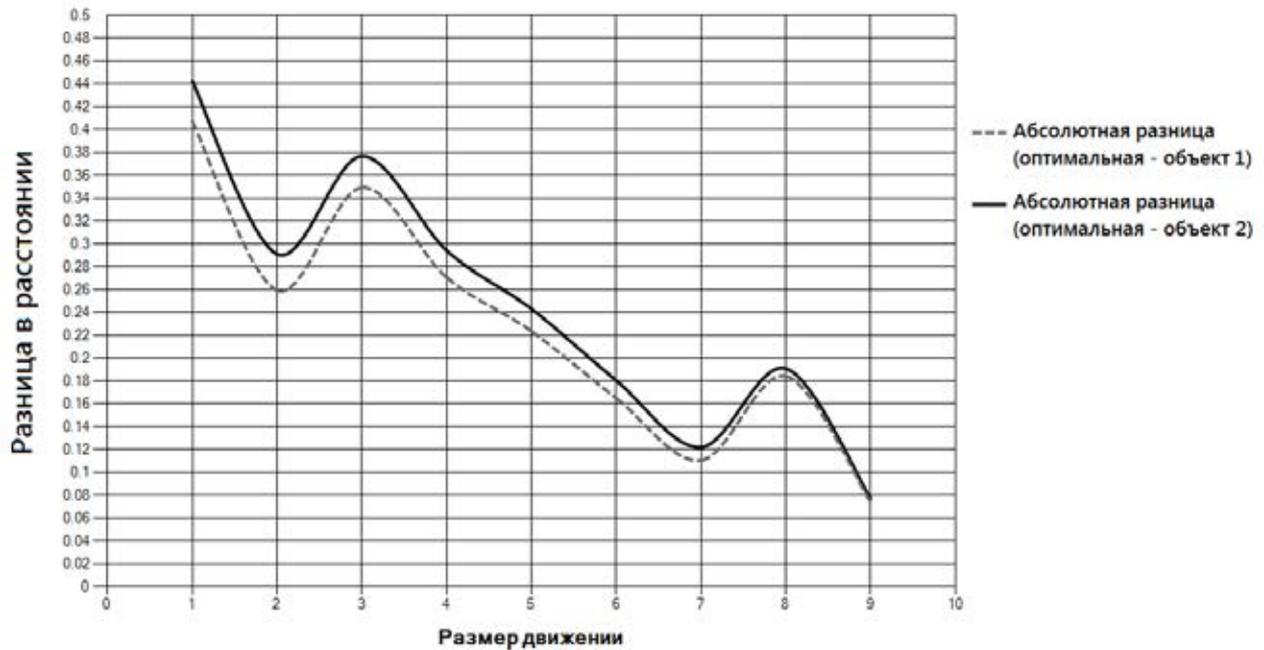


Рис. 5. Абсолютные различия между траекториями для рис. 1,б

На рис. 7 представлены результаты оценивания траектории движения аппарата для случая наблюдения трех объектов (рис. 6,а). Кривые (1), (2) и (3) являются реальными траекториями для объектов соответственно. Четвертая (4) соответствует оцениванию траектории аппарата относительно первого объекта, расположенного в центре изображения, а пятая (5) и шестая (6) соответствуют оценке траектории аппарата по второму и третьему объекту.

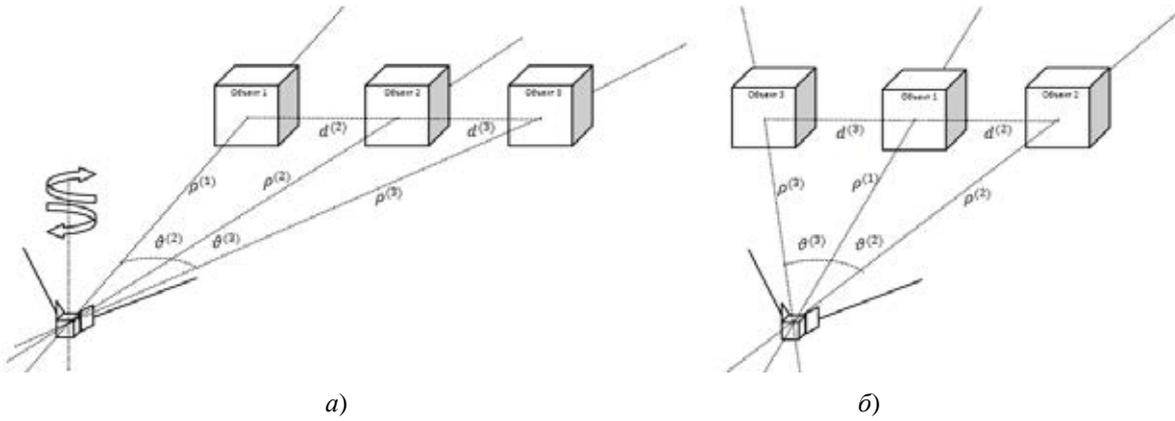


Рис. 6. Варианты размещения трех объектов в поле зрения дальномера

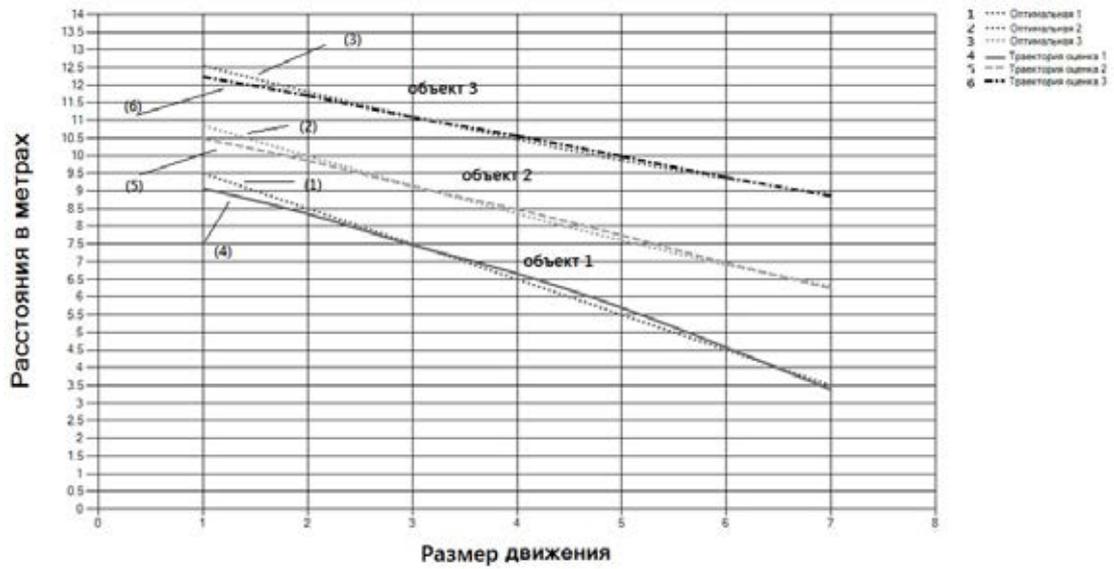


Рис. 7. Оценка траектории аппарата по трем объектам

На рис. 8 представлены абсолютные разницы между реальной траекторией и ее оценкой по каждому объекту.

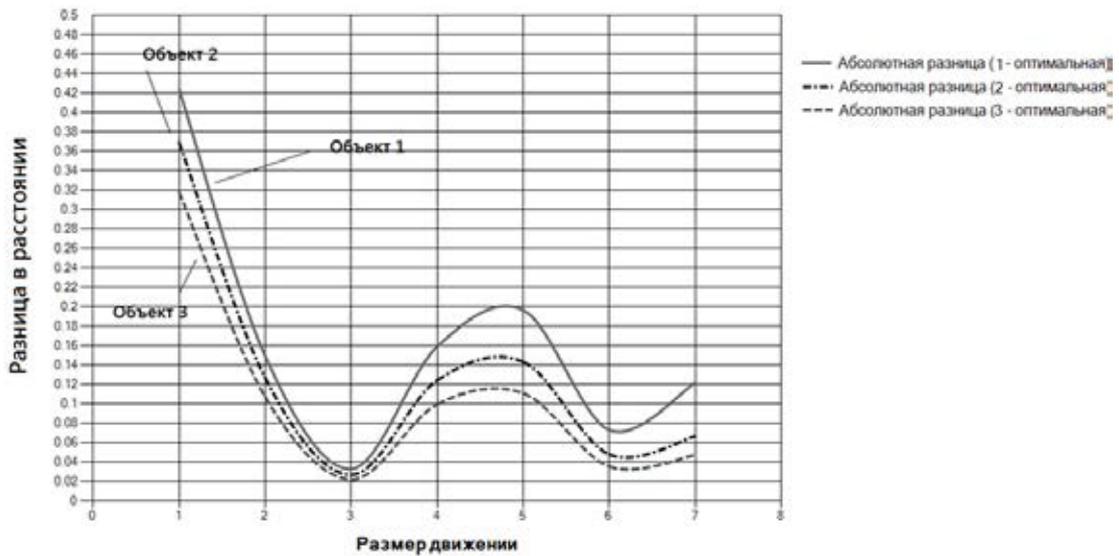


Рис. 8. Абсолютные разницы в расстоянии между реальной траекторией и ее оценкой по трем объектам в отдельности

На рис. 9 представлены результаты оценивания траектории движения аппарата во втором случае (рис. 6,б). Кривые (1) и (5) являются реальными траекториями для второго и третьего объектов соответственно. Третья (3) соответствует оценке траектории аппарата относительно первого, расположенного в центре объекта, а вторая (2) и четвертая (4) соответствуют оценке траектории аппарата по результатам обработки второго и третьего объекта. На рис. 10 представлены абсолютные различия между реальной траекторией и ее оценками и по каждому из объектов.

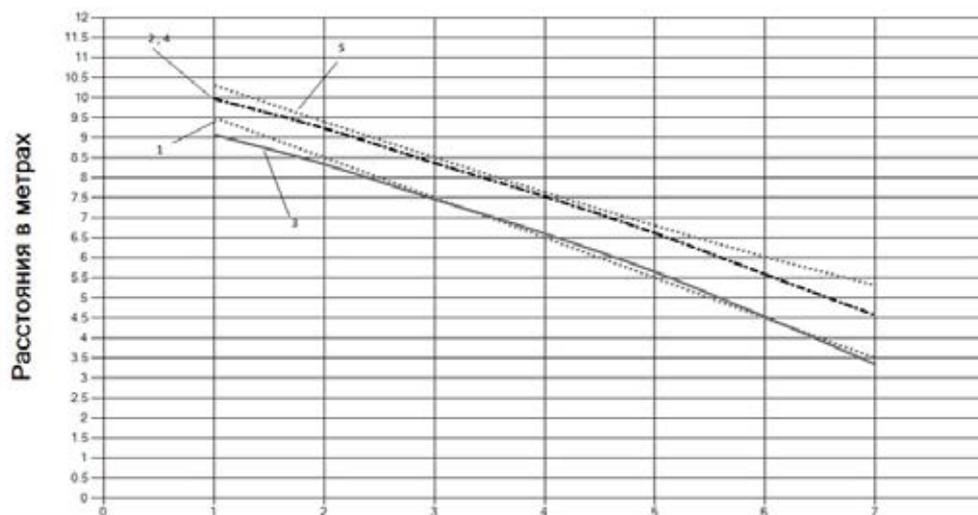


Рис. 9. Оценки траектории аппарата для случая рис. 6,б

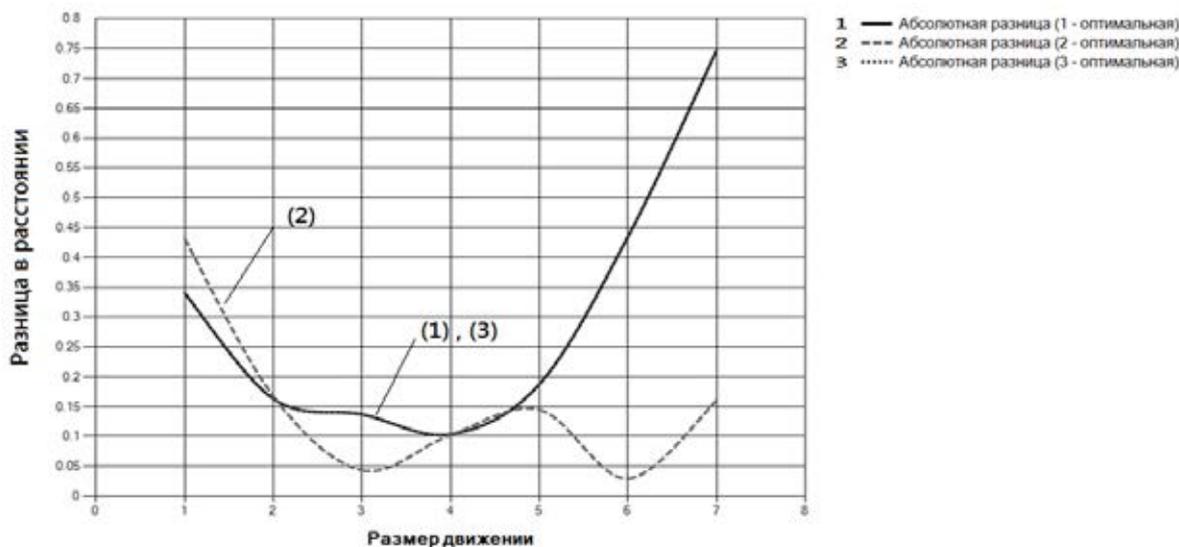


Рис. 10. Абсолютные различия между траекториями

Анализ полученных кривых показывает, что в случае наличия объекта в центре изображения возможна оценка траектории только на основании морфологических данных, т.е. без анализа распределения яркости внутри каждого из объектов. При отсутствии объекта в центре изображения такой анализ необходим. Также точность оценки траектории напрямую зависит от точности оценки масштаба.

Выводы

Таким образом, в настоящей статье представлены некоторые результаты исследования возможности оценивания траектории относительно распределенных объектов на основании результатов обработки последовательности изображений. Оценка точности траектории по каждому из

наблюдаемых объектов позволяет формировать максимально гибкие решения для определения положения аппарата и объектов в динамических среде.

Список литературы

1. Васильев, К. К. Разработка алгоритма навигации на основе данных инфракрасного дальномера Kinect / К. К. Васильев, В. Е. Дементьев, Х. А. Абдулкадим // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS-2015) : тр. Междунар. конф. (Москва, 25–27 мая 2015). – М., 2015. – С. 116–120.
2. Object Tracking Using Frame Differencing and Template Matching / N. Prabhakar, V. Vaithyanathan, A. P. Sharma, A. Singh, P. Singhal // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology / Maxwell Scientific Organization. – 2012. – Vol. 4, Iss. 24. – P. 440–442.
3. Arshad, I. Non-Linear Moving Target Tracking: A Particle Filter Approach / A. Iqbal, S. Waqar Shah, S. Khan // International Journal of Computer and Communication System Engineering (IJCCSE). – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 20–26.
4. Grzegorz, J. Combined Matching of 2nd And 3d Kinect™ Data To Support Indoor Mapping And Navigation / J. Grzegorz, Ch. Toth, Z. Koppányi, D. Grejner-Brzezinska // ASPRS 2014 Annual Conference (Louisville, Kentucky, March 23–28 2014). – Louisville, 2014. – P. 367–369.
5. Абдулкадим, Х. А. Анализ изображений, получаемых с бортовой камеры беспилотного летательного аппарата для его навигации / Х. А. Абдулкадим // Труды XIV Национальной конференции по искусственному интеллекту (КИИ-2014) (24–27 сентября 2014, г. Казань, Россия). – Казань, 2014. – С. 234–237.
6. Ташлинский, А. Г. Оценка параметров пространственных деформаций последовательностей изображений / А. Г. Ташлинский. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2000. – 132 с.
7. Абдулкадим, Х. А. Алгоритмы навигации с применением обработки изображений подстилающей поверхности / Х. А. Абдулкадим // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сб. науч. тр. / Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 190 с.
8. Kumar, A. Estimation of motion among shifted images at coarse and fine levels / A. Kumar, Ch. Kumar // International Journal of Computational Intelligence and Information Security. – India. – 2011. – December. – Vol. 2, № 12. – P. 16–26.

Абдулкадим Хуссейн Абдуламир

аспирант,
Ульяновский государственный
технический университет
(432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32)
E-Mail: hussein73@mail.ru

Васильев Константин Константинович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой телекоммуникаций,
Ульяновский государственный
технический университет
(432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32)
E-mail: vkk@ulstu.ru

Дементьев Виталий Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра телекоммуникаций,
Ульяновский государственный
технический университет
(432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32)
E-mail: dve@ulntc.ru

Аннотация. Траектория автономного аппарата может быть представлена как совокупность его положений в разные моменты времени. Эти положения могут быть оценены в результате обработки различных изображений объекта и окружающей его обстановки. Представлены некоторые результаты иссле-

Abdulkadhim Hussein Abdulameer

postgraduate student,
Ulyanovsk State Technical University
(432027, 32 Sev. Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Vasilyev Konstantin Konstantinovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of telecommunications,
Ulyanovsk State Technical University
(432027, 32 Sev. Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Dementiev Vitaliy Evgenevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of telecommunications,
Ulyanovsk State Technical University
(432027, 32 Sev. Venets street, Ulyanovsk, Russia)

Abstract. The trajectory of an autonomous vehicle can be represented as a set of its locations at different times. These locations can be estimated by processing the various images of the object and its surrounding environment. This article presents some results of studies estimating trajectory of an autonomous vehicle relative to

дований оценки траектории аппарата относительно окружающих объектов по результатам цифровой обработки последовательности изображений, зарегистрированных на основе данных контроллера Microsoft Kinect.

Ключевые слова: информационно-управляющий комплекс, наземно-космическая информационная сеть, оперативность обмена информацией, межспутниковые радиолинии, ретрансляторы.

surrounding objects by the result of digital processing of image sequence registered on the basis of Microsoft Kinect controller data.

Key words: information-managing complex, ground-space information network, rapid exchange of information, inter-satellite radio link, repeater.

УДК 621.396.933:527.8

Абдулкадим, Х. А.

Анализ алгоритмов оценивания траектории автономных аппаратов / Х. А. Абдулкадим, К. К. Васильев, В. Е. Дементьев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 113–120. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-16.

УСИЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ХИ-КВАДРАТ КРИТЕРИЯ ПРИ ДЕСЯТИКРАТНОМ УВЕЛИЧЕНИИ ЧИСЛА СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ СТАТИСТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА МАЛЫХ ТЕСТОВЫХ ВЫБОРКАХ

А. И. Иванов, Б. Б. Ахметов, Ю. И. Серикова

Введение

Информационное общество предполагает активное использование интернет-ресурсов. Государственные и частные структуры создают на своих сайтах личные кабинеты пользователей. К сожалению, существующая практика парольной защиты доступа к личным кабинетам обладает существенными уязвимостями. Пользователи не способны запоминать длинные случайные пароли. Владелец информационного ресурса не может быть уверен в том, что к личному электронному кабинету получил доступ именно его хозяин. Пароль может быть перехвачен программной закладкой, также не составляет проблемы подменить IP адрес интернет-пользователя.

Для усиления защиты доступа к электронным кабинетам в настоящее время разрабатываются технологии биометрической аутентификации личности путем преобразования личных биометрических данных человека в его криптографический ключ или длинный случайный пароль доступа. Используются такие биометрические образы, как: рисунок отпечатка пальца [1], рисунок радужной оболочки глаза [2], голосовой пароль [3], рукописный пароль [4], рисунок кровеносных сосудов глазного дна или ладони руки [5]. Естественно, что преобразователи биометрия-код не могут быть идеальными и имеют вероятности ошибок первого и второго рода. Возникает необходимость тестирования ошибок первого и второго рода на реальных биометрических данных. Кроме того, при настройке «нечетких экстракторов» [1–3] и при обучении нейросетевых преобразователей [4, 5] необходимо контролировать отсутствие в биометрических данных грубых ошибок. По сути дела, на небольшом числе примеров биометрического образа необходимо контролировать показатель близости распределения биометрических данных к многомерному нормальному закону [6]. Формально для этой цели может быть использован обычный одномерный хи-квадрат критерий Пирсона [7, 8], однако такой подход далек от оптимального. В данной статье мы попытаемся показать, что наряду с классическим критерием Пирсона можно использовать три варианта критерия Джини. Один из вариантов критерия Джини оказывается лучше, чем классический критерий хи-квадрат.

Проблема применения классического хи-квадрат критерия Пирсона на малых тестовых выборках

Наиболее популярным на сегодня является использование хи-квадрат критерия (созданного Пирсоном в 1900 г.):

$$\chi^2 = n \cdot \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{\left(\frac{n_i}{n} - p_i \right)^2}{p_i} \right\} = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{(\tilde{p}_i - p_i)^2}{p_i} \right\}, \quad (1)$$

где n_i – число отсчетов, попавших в i -й столбец гистограммы; p_i – вероятность попадания в i -й столбец гистограммы теоретического распределения; k – число столбцов гистограммы.

Широкое распространение применения хи-квадрат критерия обусловлено тем, что для него известно аналитическое описание плотности распределения:

$$p(\chi^2, m) = \left\{ \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} \left\{ x^{\frac{m}{2}-1} \cdot \exp\left(\frac{-x}{2}\right) \right\} \right\}, \quad (2)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма функция; m – число степеней свободы.

Число степеней свободы m может быть задано по-разному [8]. Например, оно может быть определено через объем тестовой выборки n :

$$m = \sqrt{n} - 3 = k - 3, \quad (3)$$

если число столбцов гистограммы k выбирается округлением до ближайшего целого величины \sqrt{n} :

$$k = \text{round}(\sqrt{n}). \quad (4)$$

Заметим, что значение числа столбцов гистограммы k и значение числа степеней свободы m для классического хи-квадрат критерия всегда оказывается много меньшими в сравнении с объемом тестовой выборки n . Так для выборки из 16 примеров необходимо интервал наблюдаемых биометрических данных разбить на четыре интервала и построить по ним гистограмму, как это показано на рис. 1.

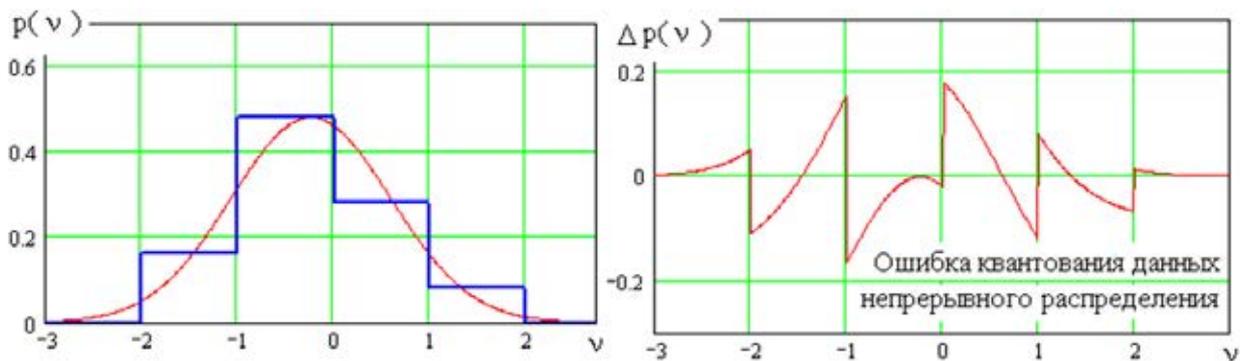


Рис. 1. Приближение непрерывной нормальной плотности распределения значений гистограммы, содержащей четыре интервала $k = 4$ для выборки из 15 примеров

При построении гистограммы мы фактически осуществляем ступенчатое квантование непрерывного закона распределения значений. В связи с этим возникает ошибка квантования, кривая для которой отображена в правой части рис. 1. Получается, что мощность различных статистических критериев во многом определяется тем, как тот или иной критерий подавляет ошибку квантования, возникающую из-за ограниченного объема исходных данных.

В этом отношении критерий хи-квадрат является не самым эффективным. По этой причине в рекомендациях Госстандарта [8] рассматриваются выборки, состоящие из 200 примеров и более. Выборки из 9, 16, 25 примеров считаются слишком малыми для хи-квадрат критерия, так как для них число степеней свободы составит 1, 2, 3. Столь малое число степеней свободы плотности хи-квадрат критерия (2) не дает надежды на приемлемое качество принимаемых решений.

Оценка мощности критерия по равной вероятности ошибок первого и второго рода

Следует отметить, что оценка мощности хи-квадрат критерия во многом остается субъективной. В частности, это связано с тем, что уровень доверительной вероятности принимаемых решений выбирает сам исследователь. Исключим эту неопределенность. Далее будем судить о качестве принимаемых решений по точке равновероятных ошибок первого и второго рода $P_1 = P_2 = P_{EE}$. Этот параметр оказывается работоспособен в ситуации, когда критерий хи-квадрат настроен на нормальный закон распределения значений, а воздействие на него осу-

ществляется как данными с нормальным законом, так и данными с равномерным законом. Подобный численный эксперимент легко реализуем на обычной вычислительной машине. Его результаты отражены на рис. 2.

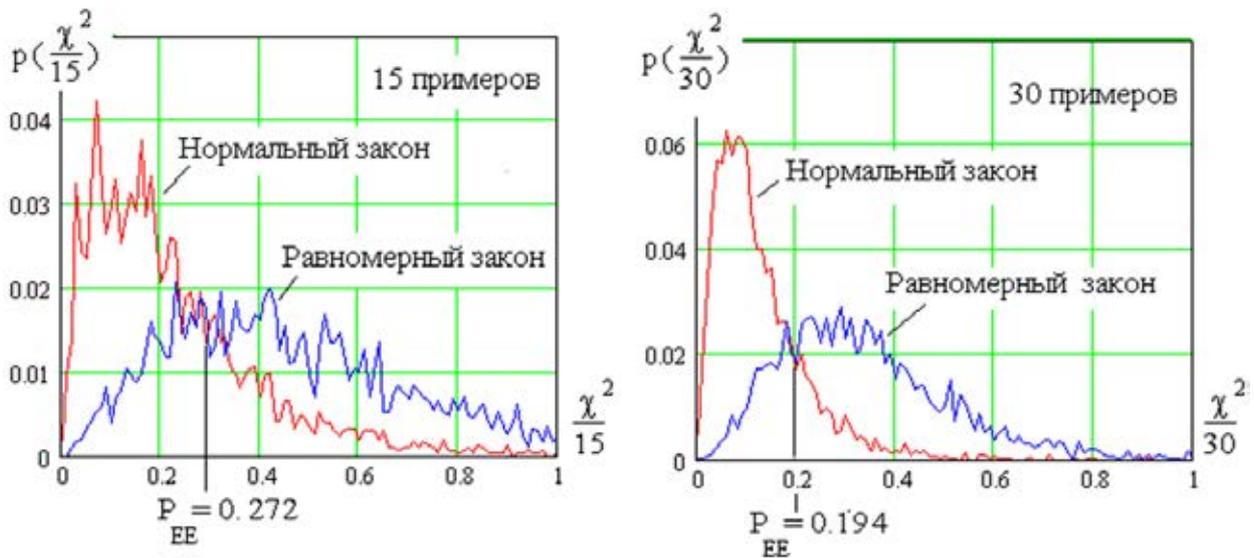


Рис. 2. Результаты численного эксперимента по оценке мощности хи-квадрат критерия для выборок, состоящих из 15 и 30 примеров, при одинаковом числе столбцов гистограммы

Из рис. 2 видно, что для выборок из 15 примеров равновероятная ошибка составляет $P_{EE} = 0,272$, если же объем тестовой выборки увеличить до 30 примеров, то равновероятная ошибка падает до величины $P_{EE} = 0,194$. С увеличением объема тестовой выборки в 2 раза происходит снижение примерно в $\sqrt{2}$ раз вероятности появления ошибок.

На практике удобно пользоваться логарифмической шкалой значений равновероятных ошибок. При логарифмическом представлении данных мощность хи-квадрат критерия хорошо описывается ломаными линиями при использовании на каждом участке своего числа примеров в обучающей выборке и своего числа столбцов гистограммы. Для того, что бы уйти от этого эффекта, будем использовать гистограмму, состоящую из шести столбцов для выборки изменяющейся от 5 до 30 примеров. Данные о мощности критерия хи-квадрат отображены в верхней части рис. 3.

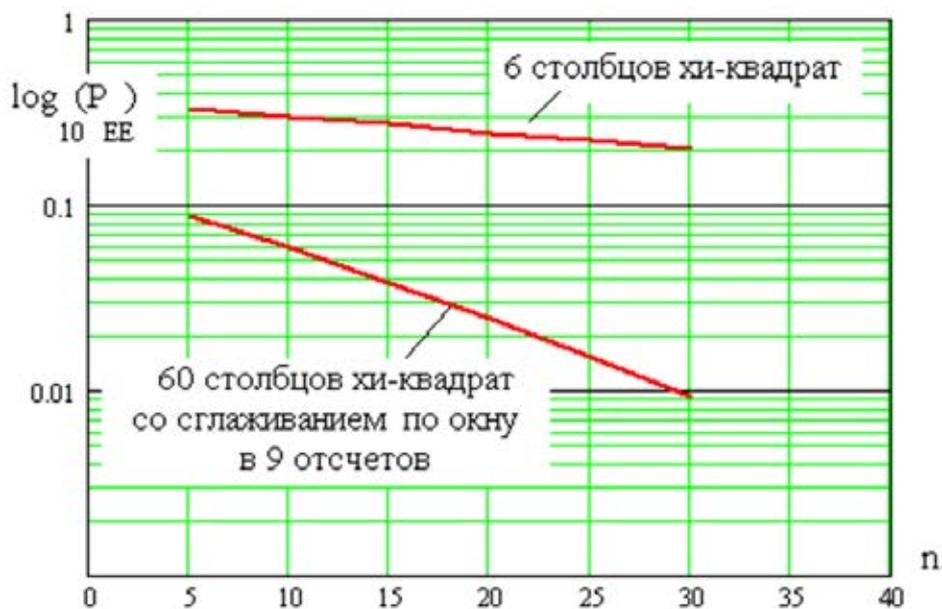


Рис. 3. Мощность хи-квадрат критерия в логарифмической шкале равновероятных ошибок

Из рис. 3 видно, что при одинаковом числе столбцов гистограммы в логарифмическом масштабе происходит линейное уменьшение вероятности ошибок, т.е.

$$\log(P_{EE}(n)) = -0,45 - 0,0086n. \quad (5)$$

При 30 опытах для шести столбцов гистограммы вероятность равновероятной ошибки составляет порядка 0,2, что является слишком большой величиной.

Повышение мощности хи-квадрат критерия Пирсона путем искусственного 10-кратного увеличения столбцов гистограммы

Очевидным является то, что при построении гистограмм реальных данных крайне важным является выбор числа столбцов. Выбор этого параметра во многом субъективен, разные источники дают разные рекомендации. В частности, рекомендации Госстандарта по применению хи-квадрат критерия [8] содержат пять разных правил по выбору числа интервалов гистограммы. Опыт подсказывает, что выбор слишком больших интервалов приводит к большой амплитуде и низкой частоте шумов ошибок квантования. Если же мы примем слишком малые интервалы столбцов гистограммы, то мы получим высокую частоту шума квантования и высокую амплитуду этого шума. На рис. 4 отображена ситуация, когда интервалы гистограммы взяты в 10 раз более узкими, в сравнении с правилом выбора, представленным в выражении (4).

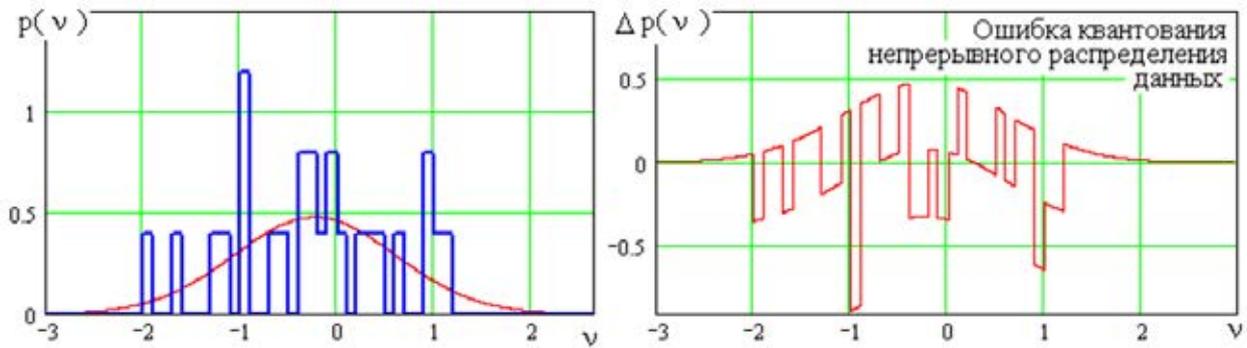


Рис. 4. Гистограмма данных и шум ошибки квантования непрерывного распределения данных при интервалах обработки, взятых в 10 раз уже, чем дает формула (4)

Из левой части рис. 4 видно, что гистограмма имеет очень много пустых столбцов, а ее форма стала не похожа на форму непрерывного распределения данных. Уменьшить амплитуду шума квантования и заполнить пустые интервалы столбцов гистограммы удастся, если запустить сглаживающий цифровой фильтр [9–11]. Эта процедура приводит к появлению еще одной модификации хи-квадрат критерия со сглаживающим шум квантования фильтром линейным усредняющим фильтром по скальзящему интервалу. Программная реализация такого фильтра для окна сглаживания в девять отсчетов занимает две строки в среде математического моделирования MatCAD:

$$\begin{cases} i := 4, \dots, (last(g) - 4); \\ sg_i := \frac{g_{i-4} + g_{i-3} + g_{i-2} + g_{i-1} + g_{i-0} + g_{i+1} + g_{i+2} + g_{i+3} + g_{i+4}}{9}, \end{cases} \quad (6)$$

где g_i – отсчеты гистограммы со слишком узкими столбцами; sg_i – выходные отсчеты сглаживающего данные фильтра. Результаты работы сглаживающего фильтра приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что форма восстановленной гистограммы хорошо повторяет форму непрерывного распределения данных, шум ошибок квантования существенно снизился. Все это приводит к значительному росту мощности сглаженного дифференциального критерия Джини. На рис. 3 соответствующая прямая понижения вероятности ошибок расположена ниже других, т.е. мощность сглаженного критерия хи-кадрат оказывается много выше мощности обычного хи-квадрат критерия без сглаживания [12–14].

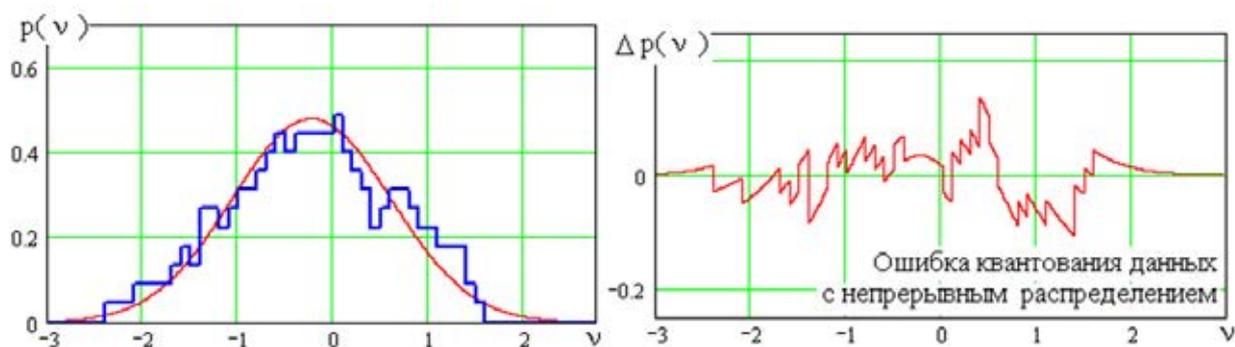


Рис. 5. Восстановленная сглаживанием гистограмма с числом столбцов в 10 раз больше чем рекомендует формула (4) и соответствующий ей шум квантования

Хорошее приближение мощности сглаженного хи-квадрат критерия дает следующее соотношение:

$$\log(P_{EE}(n)) = -0,82 - 0,039n. \quad (7)$$

Заключение

В силу того, что мы в 10 раз повысили число столбцов гистограммы, как следствие, примерно в 10 раз увеличили и число степеней свободы хи-квадрат критерия. Естественно, что при этом выросла в 10 раз частота шумов квантования, однако при этом многократно выросла и амплитуда шумов квантования. В данной статье показано, что линейного сглаживающего фильтра (6) достаточно для снижения амплитуды шума квантования до приемлемого уровня, обеспечивающего 20-кратный выигрыш по итоговой вероятности принятия ошибочных решений.

Казалась бы, что линейное увеличение частоты квантования и последующее сглаживание линейным фильтром должны друг друга скомпенсировать и не давать ощутимого результата. На самом деле это не так. Каждый статистический критерий является некоторым нелинейным сглаживающим фильтром. Именно по этой причине последовательность выполняемых операций играет важную роль.

Описанные в данной статье операции увеличения числа столбцов гистограммы и последующего линейного сглаживания могут быть эффективны только при включении их в состав нелинейного сглаживающего фильтра (некоторого статистического критерия). Для разных статистических критериев выигрыш будет различен. Все известные статистические критерии следует проверить на их возможное увеличение мощности при искусственном увеличении числа степеней свободы или числа столбцов гистограмм. На данный момент проверенными оказываются только дифференциальный критерий Джини [9–11], для которого выигрыш в мощности составляет примерно 2 раза, и хи-квадрат критерий, обеспечивающий 20-кратный выигрыш.

Список литературы

1. Ramírez-Ruiz, J. Cryptographic Keys Generation Using FingerCodes / J. Ramírez-Ruiz, C. Pfeiffer, J. Nolasco-Flores // *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA 2006 (LNCS 4140)*. – 2006. – P. 178–187.
2. Cryptographic key generation from voice / F. Monroe, M. Reiter, Q. Li, S. Wetzel // *Proc. IEEE Symp. on Security and Privacy*, 2001. – P. 17–19.
3. Feng, Hao. Crypto with Biometrics Effectively / Feng Hao, Ross Anderson and John Daugman // *IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS*. – 2006. – Vol. 55, № 9. – September.
4. Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, И. Г. Назаров. – М.: Радиотехника, 2012. – 157 с.
5. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа: моногр. / Б. С. Ахметов, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, А. В. Безяев, Е. А. Малыгина. – Казахстан: Изд-во ЛЕМ, 2014. – 144 с.
6. Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 161 с.

7. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
8. Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 . – М. : Госстандарт России, 2001. – 140 с.
9. Серикова, Н. И. Линейное сглаживание гистограмм биометрических данных, искусственно увеличивающее число степеней свободы при оценивании статистических гипотез // Труды научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. – Пенза, 2014. – Т. 9. – С. 29–31. – URL: <http://www.pniei.penza.ru/RV-conf/T9/C29>
10. Серикова, Н. И. Биометрическая статистика: сглаживание гистограмм, построенных на малой обучающей выборке / Н. И. Серикова, А. И. Иванов, С. В. Качалин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2014. – № 3 (55). – С. 146–150.
11. Серикова, Н. И. Оценка правдоподобия гипотезы о нормальном распределении по критерию Джини для сглаженных гистограмм, построенных на малых тестовых выборках / Н. И. Серикова, А. И. Иванов, Ю. И. Серикова // Вопросы радиоэлектроники. – М. : ЦНИИ «Электроника», 2015. – Вып. 1. – С. 85–94.
12. Использование среднего геометрического, ожидаемой и наблюдаемой функций вероятности как статистического критерия оценки качества биометрических данных / Б. С. Ахметов, А. И. Иванов, К. А. Перфилов, Е. Д. Проценко, Д. С. Пашенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 281–283.
13. Быстрый алгоритм оценки высокоразмерной энтропии биометрических образов на малых выборках / Б. С. Ахметов, А. И. Иванов, А. Ю. Мальгин, А. В. Безяев, А. И. Газин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 283–285.
14. Использование множества подобных критериев для случайного выбора контролируемых параметров при многомерном статистическом анализе малой выборки биометрических данных / Б. С. Ахметов, К. Мукапил, Н. И. Серикова, С. Е. Вятчанин, Ю. И. Никитченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 285–288.

Иванов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент,
начальник лаборатории биометрических
и нейросетевых технологий,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Ахметов Берик Бахытжанович

кандидат технических наук, профессор,
вице-президент Международного
Казахско-Турецкого университета
имени А. Ясави
(Казахстан, г. Туркестан, ул. Б. Саттарханов, 29)
E-mail: berik.akhmetov@ayu.edu.kz

Серикова Юлия Игоревна

магистрант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: julia-ska@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При статистической обработке реальных данных химии, экономики, биометрии, медицины обычно приходится пользоваться ограниченными тестовыми выборками. Целью данной работы является повышение мощности хи-квадрат критерия за счет искусственного увеличения числа степеней свободы при статистических вычислениях. *Материалы и методы.* Предложено

Ivanov Aleksandr Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
head of laboratory of biometric
and neural-network technologies,
Penza Research Electrotechnical Institute
(440000, 9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Akhmetov Berik Bakhytzhonovich

candidate of technical sciences, professor,
vice president of International Kazakh-Turkish
University named after A. Yasavi
(29 B. Sattarhanov street, Turkestan, Kazakhstan)

Serikova Yuliya Igorevna

master degree student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. *Background.* Statistical processing of real data of chemistry, economics, biometrics, medicine is usually necessary to use the limited test samples. The aim of this work is to increase the power of the chi-square test due to an artificial increase in the number of degrees of freedom in statistical calculations. *Materials and methods.* It is proposed to increase by 10 times the number of histogram intervals, which leads to the emergence of a

увеличить в 10 раз число интервалов гистограммы, что приводит к появлению большого числа пустых интервалов. Пустые интервалы заполняются линейным сглаживающим фильтром с прямоугольным окном усреднения без фазовых искажений. Ширина окна сглаживающего фильтра выбрана равной девяти отсчетам. *Результаты и выводы.* Показано, что искусственное повышение числа степеней свободы у критерия Пирсона приводит к росту его мощности. Даны оценки повышения мощности критерия для 5, 6, ..., 30 примеров в тестовой выборке. Мощность критерия оценивается как отрицательный логарифм равновероятных ошибок первого и второго рода при нормальном и равномерном распределениях тестируемых данных. Отмечено снижение вероятности ошибок до 20 раз на выборке в 30 примеров за счет реализации предложенного в работе алгоритма статистической обработки.

Ключевые слова: хи-квадрат критерий, малые выборки, искусственное увеличение числа степеней свободы.

large number of empty slots. Empty slots are filled with a linear smoothing filter with a rectangular window averaging without phase distortion. The width of the smoothing filter window is selected to be 9 counts. *Results and conclusions.* It is shown that an artificial increase in the number of degrees of freedom at Pearson leads to the growth of its power. Estimations criterion for increasing the power of 5, 6, ..., 30 in a test sample examples. Power criteria is assessed as negative logarithm of the equally probable errors of the first and second kind in the normal and uniform distribution of the test data. A decrease in the probability of error of up to 20 times on a sample of 30 examples by implementing proposed in statistical processing algorithm.

Key words: chi-squared test, a small sample, the artificial increase in the number of degrees of freedom.

УДК 519.24; 57.017

Иванов, А. И.

Усиление мощности хи-квадрат критерия при десяти кратном увеличении числа степеней свободы статистических вычислений на малых тестовых выборках / А. И. Иванов, Б. Б. Ахметов, Ю. И. Серикова // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 121–127. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-17.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Э. В. Лапшин, Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов

Введение

Концепция модульности предполагает возможность объединения, разделения и модификации отдельных элементов без их влияния на систему в целом [1–5]. При модульной архитектуре систем модули могут создаваться независимо друг от друга и объединяться в блоки для получения необходимых результатов. Многие элементы модульности (модули пилотажных приборов, силовой установки, подвижности; кабина, вычислитель, пульт инструктора и др.) уже используются в современных тренажерах. Однако до последнего времени объединение модулей традиционно требовало больших временных и финансовых затрат (иногда ожидаемая выгода не достигалась или требовались чрезмерные усилия). Так, во многих пилотажных приборах используются аналоговые данные, а в ряде других приборов и вычислителях используются цифровые данные. Налицо обмен в АТ большими потоками различной информации. Наибольшие трудности связаны с необходимостью выполнения всех операций в реальном масштабе времени.

Модульный подход, облегчая некоторые трудности, налагает дополнительные ограничения, связанные с приведением данных в совместимую форму, на систему в целом. Однако если указанные проблемы будут решены, то присущая модульному подходу гибкость будет значительно перекрывать указанные ограничения по обработке данных. Вычисления могут распределяться между различными процессорами.

Существует потенциальная опасность выбора узкоспециализированного подхода с определением некоторой архитектуры ЭВМ и установкой жесткой структуры интерфейса с применением специального языка программирования. Должна существовать возможность создания новых необходимых модулей на основе единого подхода для обеспечения совместимости модулей друг с другом.

Модульность

При модульном подходе модули и интерфейс могут рассматриваться с функциональной точки зрения (*логический уровень*) или система рассматривается как набор аппаратных и программных модулей (*физический уровень*). Указанное разделение позволяет достичь *основной цели* – *разделить указанные уровни так, чтобы изменения на одном уровне не вызывали изменений на другом*. Так, можно модернизировать модули акселерационных эффектов, визуализации, установить другие ЭВМ и т.д. без изменения логической структуры АТ или, наоборот, использовать различные элементы физического уровня для создания конкретных АТ.

Решение вопроса о взаимодействии модулей на самом деле является решением задачи передачи данных от модуля к модулю. Для их связи необходима схема сопряжения (в идеале – универсальная).

Специального рассмотрения при модульном подходе требует вопрос программного обеспечения. Наибольшие усилия затрачены на обеспечение мобильности программного обеспечения. Доля стоимости математического обеспечения в общей стоимости АТ постоянно возрастает. Поэтому повышение эффективности труда программиста становится все более важной проблемой.

Во избежание сложности внедрения технических новшеств требования к модулям, интерфейсу и другим не должны быть чрезмерно жесткими и замыкаться на существующих технологиях. Залог успеха – в создании достаточно гибких модулей и системы в целом. Модуль должен определяться функционально. Типы используемых ЭВМ, длина слов, язык программирования и

т.п. не должны входить в определение модуля. При определении модулей, интерфейса, утверждении стандартов (для исключения разногласий) головная организация, координируя деятельность подрядчиков, должна исполнять и роль эксперта.

Рассмотренный подход использовался при разработке ряда комплексных тренажеров транспортных самолетов, широко используемых для подготовки летного состава в учебно-тренировочных центрах как гражданской, так и военной авиации.

В состав комплексного тренажера входят:

- кабина с рабочими местами двух пилотов, бортинженера и инструктора, устанавливаемая на шестистепенном стенде имитатора акселерационных эффектов;
- базовый вычислитель, включающий пять ЭВМ и устройство комплексирования;
- модуль информационного обмена, состоящий из пяти стоек абонентских терминалов, расположенных вне кабины, и двух стоек – в кабине;
- модуль имитатора визуальной обстановки, включающий генератор изображения и модуль отображения визуальной обстановки;
- рабочее место инструктора вне кабины тренажера;
- две стойки с бортовыми ЦВМ;
- модуль имитатора метеонавигационной радиолокационной станции МНРЛС-85;
- модуль общего электропитания с автономным комплектом первичного электропитания для базового вычислителя тренажера;
- модуль кондиционирования воздуха в кабине тренажера.

На рис. 1 приводится модульная структура комплексного тренажера самолета.

Приняты следующие обозначения:

- АГБ – авиагоризонт бомбардировщика,
- АРК – автоматический радиокompас,
- АСУТ – автоматическая система управления тягой,
- АСШУ – автоматическая система штурвального управления,
- БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система,
- БСКД – бортовая система контроля двигателей,
- ВКУ ССВО – видеоконтрольное устройство синтезирующей системы визуальной обстановки,
- ВК1(2,3,4,5) – вычислительный комплекс № 1 (№ 2, № 3, № 4, № 5),
- ВОР – радиотехническая система ближней навигации по маякам ВОР,
- ВПС – взлетно-посадочные средства,
- ВСС, ВСУП, ВСУТ – вычислительные системы самолетовождения, управления полетом и тягой соответственно,
- ДМ – дисплейный модуль,
- ДМЕ – радиодальномер,
- ИАШ, ИАЭ ИПП – имитаторы акустических шумов, акселерационных эффектов и пилотажных приборов соответственно,
- ИМ КИСС – индикатор многофункциональный комплексной информационной системы сигнализации,
- КИНО – комплексный индикатор навигационно-тактической обстановки,
- КИСС – комплексная информационная система сигнализации,
- КПИ – комплексный пилотажный индикатор,
- МНРЛС – метеонавигационная радиолокационная станция,
- МПД – модуль передачи данных,
- МСРП – магнитный самописец речи и параметров,
- ПОС – противообледенительная система,
- ПУ – пульт управления,
- РВ-85 – радиовысотомер,
- РИ – речевой информатор,
- ИАШ, ИАЭ ИПП – имитаторы акустических шумов, акселерационных эффектов и пилотажных приборов соответственно,

КИ-13 – магнитный компас,
 МНРЛС – метеонавигационная радиолокационная станция,
 МПД – модуль передачи данных,
 МСРП – магнитный самописец речи и параметров,
 РМИ – рабочее место инструктора,
 РМИ-2Б – радиомагнитный индикатор,
 РСБН, РСДН – радиотехнические системы ближней и дальней навигации соответственно,
 САС, СВС, СДУ-6, СИО, СНС – системы аварийной сигнализации, воздушных сигналов, дистанционного управления, информационного обмена и спутниковая навигационная система соответственно,
 СО – самолетный ответчик,
 СОК – система объективного контроля,
 СПКР, СППЗ, СРД, ССЛО – системы предупреждения критических режимов, предупреждения о приближении к земле, регулирования давления, сбора и локализации отказов соответственно,
 СУ – силовая установка,
 СУД, СЭИ – системы управления двигателями и электронной индикации соответственно,
 УС – указатель скорости,
 ХАЭ – хронометр авиационный электронный,
ILS – радиотехническая система посадки по маякам ИЛС/СП,
MLS – микроволновая система посадки.

Возможны два варианта модульного построения АТ.

В первом (связи показаны сплошными линиями) к каждому ВК через интерфейс типа «Общая шина» подключается контроллер одной стойки абонентских терминалов с модулями СИО и используемым бортовым оборудованием. К каждой стойке абонентских терминалов бортовое оборудование подключается с учетом задач, решаемых вычислительным комплексом. Например, в ВК2 решаются задачи модуля динамики полета, системы дистанционного управления, автоматической системы штурвального управления.

К стойке абонентских терминалов, взаимодействующих с ВК2, подключаются органы управления полетом, бортовое оборудование (систем, связанных с ВСУП, ВСУТ, СПКР, СППЗ) и модуль имитатора акселерационных эффектов. Для уменьшения запаздывания к общей шине ВК 2 подключается модуль имитации визуальной обстановки. Здесь возможно создание тренажера из функционально-законченных модулей:

- пилотажного модуля (включает ВК 2, ВК 3, две стойки абонентских терминалов и соответствующее оборудование);
- модуля бортинженера (включает ВК 4, стойку абонентских терминалов, приборы, органы управления, сигнализаторы силовой установки, бортовых систем контроля двигателей, топливной системы, системы регулирования давления, КИСС);
- модуля самолетовождения (включает ВК 5, стойку абонентских терминалов, бортовое оборудование системы самолетовождения и радиотехнических систем; к общей шине ВК 5 подключается имитатор МНРЛС-85);
- модуля инструктора (включает ВК 1, стойку абонентских терминалов, оборудование рабочего места инструктора).

Такое построение позволяет разрабатывать и специализированные тренажеры (естественно, с объемом решаемых задач, меньшим, чем в комплексном АТ). Запаздывание от управляющего воздействия от штурвала до изменения изображения в имитаторе визуальной обстановки определяется запаздыванием собственно имитатора визуальной обстановки (до 120 мс) и 1–2 циклами решения задач (при цикле решения 50 мс запаздывание составляет 170–220 мс).

Во втором варианте (связи показаны пунктирными линиями) контроллеры стоек абонентских терминалов подключаются не к интерфейсу «Общая шина» ВК1–ВК5, а к магистрали МПД (подключается к одному из входов общего поля памяти ОЗУ). Здесь устройство комплексирова-

ния ОЗУ, кроме функций обмена данными между ВК1–ВК5, выполняет функции приема и передачи данных от оборудования кабины и рабочего места инструктора. Это позволяет создать гибкую структуру вычислительной системы тренажера, обеспечивающую перераспределение потоков информации (позволяет уменьшить количество коммутирующих средств). Эксплуатационная надежность тренажера во многом определяется надежностью устройства комплексирования (отказ устройства приведет к отказу тренажера в целом).

С учетом изложенного выше очевидна целесообразность построения тренажера по первому варианту, что практически и реализовано.

Модуль имитатора динамики полета

Структурная схема с указанием взаимосвязей с другими имитаторами приводится на рис. 2.

Приняты обозначения:

ВСС-85 – вычислительная система самолетовождения,

ВСУП-85 – вычислительная система управления полетом,

ВСУТ-85 – вычислительная система управления тягой,

СЭИ-85 – система электронной индикации,

ИК – истинный курс,

ПВПП – признак касания ВПП.

Остальные обозначения общепринятые.

Воспроизводится движение самолета в пространстве (решение замкнутой системы нелинейных дифференциальных уравнений; входные параметры – управляющие воздействия экипажа, выходные – параметры полета).

Моделируются [5–8]:

- движение по ВПП и рулежным дорожкам;
 - взлет и набор высоты;
 - полет по маршруту, снижение и заход на посадку;
 - уход на второй круг (с использованием средств комплекса стандартного пилотажно-навигационного оборудования);
 - экстренное снижение;
 - полет по кругу, заход на посадку и посадка;
 - пробег по ВПП с использованием всех средств торможения;
 - полет при опасных внешних воздействиях.
- Учитываются:
- температура воздуха и атмосферное давление;
 - высота (уровень местности) аэродрома;
 - горизонтальная составляющая скорости ветра;
 - сдвиг и порывы ветра (вертикальный и горизонтальный);
 - обледенение (изменение аэродинамических характеристик);
 - состояние ВПП;
 - сила тяжести и центровка самолета;
 - режимы работы силовой установки (включая реверс);
 - положение управляющих поверхностей, механизация крыла, шасси (при движении по земле учитываются характеристики устойчивости и управляемости; коэффициенты увода и трения колес с учетом состояния ВПП, торможения колес и работы антиюзového устройства);
 - аэроупругость.

Для обеспечения подобия реального и моделируемого полета самолета осуществляется непрерывное вычисление параметров полета в реальном масштабе времени. Экипажу с соответствующих модулей предоставляются визуальная, акустическая, акселерационная информации, показания приборов пилотажно-навигационного комплекса, положения и усилия на органах управления (формируемых в соответствии с параметрами, получаемыми в имитаторе динамики полета (ИДП)).

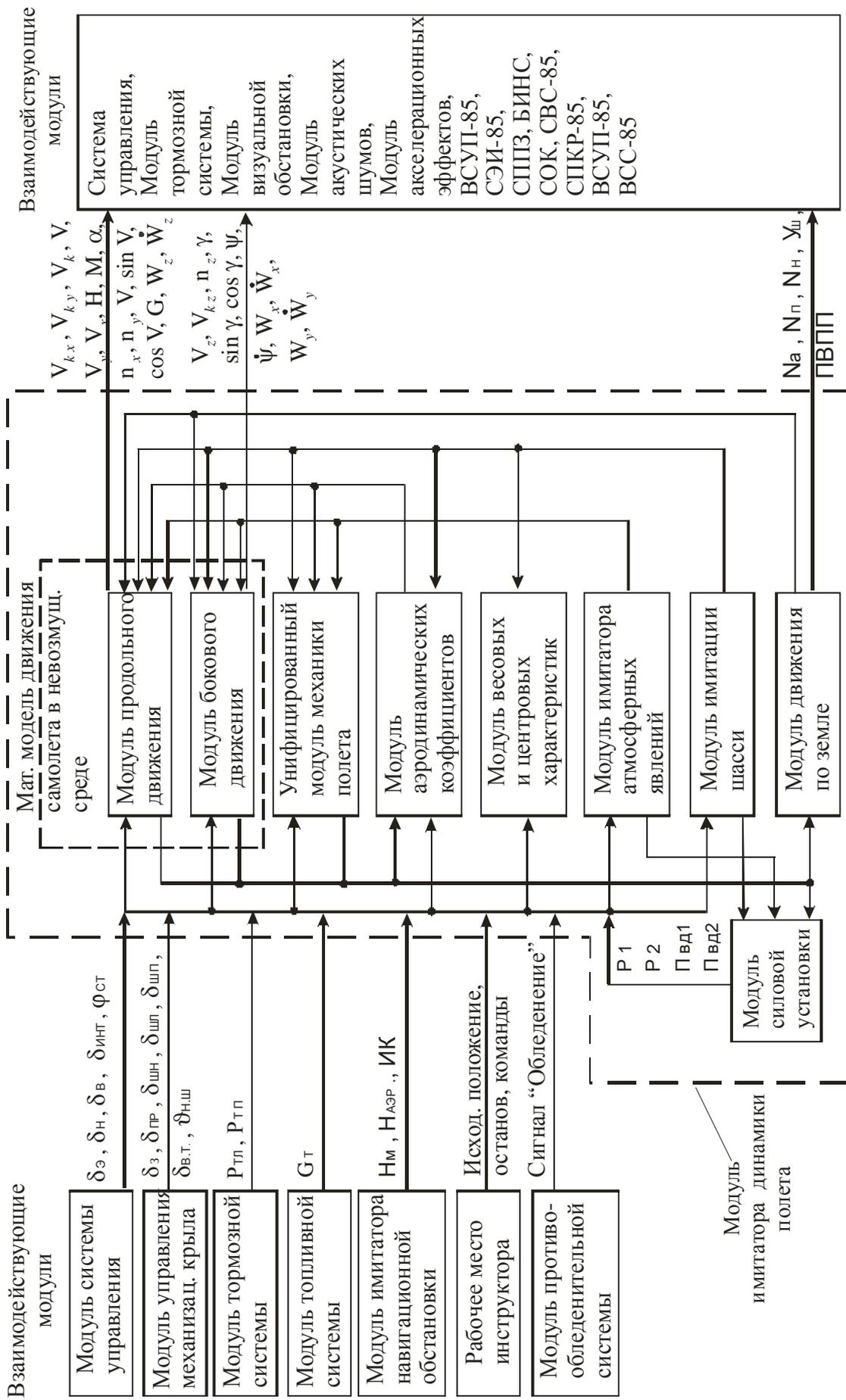


Рис. 2. Структурная схема модуля имитатора динамики полета

Производится декомпозиция системы уравнений движения (продольное и боковое движение, движение по земле, модуль аэродинамических коэффициентов).

Шаг интегрирования задается из условий устойчивости и мощности ЭВМ.

Предусматривается возможность программного ввода и вывода значений физических параметров на дисплей.

Модуль имитатора системы управления

Структурная схема приводится на рис. 3. Приняты обозначения:

АБТ – абонентский терминал,

$I_{АСШУ1}$, $I_{АСШУ2}$, $I_{АСШУ3}$ – индикация исправности каналов АСШУ,

КИСС – комплексная информационная система сигнализации,

РВ, РН, ЭЛ – рули высоты и направления; элерон,

$P_{СУР1}$, $P_{СУР2}$, $P_{СУР3}$, $X_{МРЗ}$ – индикаторы давления в каналах гидросистемы и положения механизма регулирования загрузки.

Используется полунатурное моделирование на базе бортового оборудования. Обеспечивает имитацию работы каналов управления стабилизатором, рулем высоты, элеронами, интерцепторами, воздушными тормозами и рулем направления [9–12].

В модуле имитируются вероятные отказы реальной системы управления самолета:

- электрической системы балансировки канала управления стабилизатором;
- электродистанционной системы регулирования диапазона подключения дополнительной загрузки колонок;

- электродистанционных контуров управления СДУ;

- в системах электро- и гидропитания,

- заклинивание аварийных механических проводок.

В модуле имитатора проявляются отказы, имитируемые в имитаторах АСШУ-204 и ВСУП-85.

Модуль имитатора силовой установки

Структурная схема приводится на рис. 4. Приняты обозначения:

ВСУ – вспомогательная силовая установка,

ПЗ ВСУ, ПНТ, ПНШ, ПОШ, ПП, ПП ВСУ, ППД, ПРАП, ПРГС, ПРЭС, ПСТ, ПУПК, ППОМ, ПРЕВ – соответственно признаки запуска ВСУ,

- работа вспомогательной силовой установки на земле и в полете в эксплуатационном диапазоне высот и скоростей;

- останов двигателей на земле и в полете;

- запуск двигателей в воздухе (с блокировкой и без нее);

- отбор мощности для режимов загрузки генератора $P_{ген} = 60$ кВА и отбор воздуха $\dot{G}_{в.отб} = 0-2,5$ кг/с;

- имитация неудачного запуска силовой установки в диапазоне высот и скоростей, не оговоренных в «Руководстве по летной эксплуатации» (повышение температуры газа выше 570 °С, зависание оборотов двигателей $n_{всу} = (30 \pm 5)\%$, автоматическое прекращение запуска при включенной защите по предельным параметрам).

Обеспечивается воспроизведение следующих режимов работы маршевых двигателей:

- подготовка двигателей к запуску;

- проверка электронной части системы регулирования двигателя (РЭД) с использованием встроенного контроля;

- работа вспомогательной силовой установки на земле и в полете в эксплуатационном диапазоне высот и скоростей;

- останов двигателей на земле и в полете;

- запуск двигателей в воздухе (с блокировкой и без нее);

- отбор мощности для режимов загрузки генератора $P_{ген} = 60$ кВА и отбор воздуха $\dot{G}_{в.отб} = 0-2,5$ кг/с;

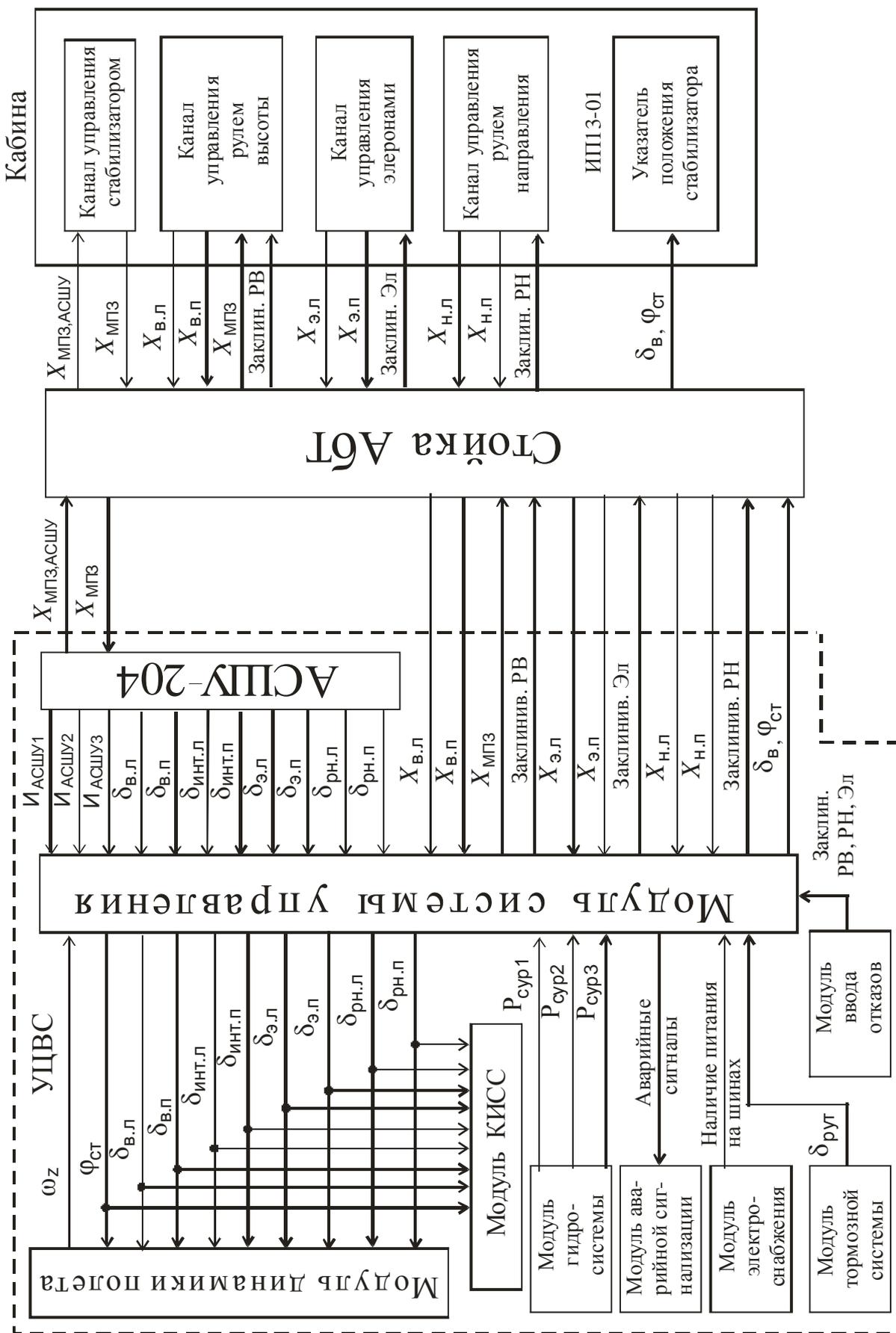


Рис. 3. Структурная схема модуля системы управления

- имитация неудачного запуска силовой установки в диапазоне высот и скоростей, не оговоренных в «Руководстве по летной эксплуатации» (повышение температуры газа выше 570° С, зависание оборотов двигателей $n_{всy} = (30 \pm 5) \%$;

- автоматическое прекращение запуска при включенной защите по предельным параметрам).

Обеспечивается воспроизведение следующих режимов работы маршевых двигателей:

- подготовка двигателей к запуску;
- проверка электронной части системы регулирования двигателя (РЭД) с использованием встроенного контроля;

- холодная прокрутка двигателей;

- ложный запуск и запуск двигателей на земле (от наземных и бортовых источников питания);

- прогрев и опробование двигателей;

- работа двигателей на установившихся и переходных режимах во всем эксплуатационном диапазоне скоростей (в диапазоне высот 0–13000 м);

- нормальный и экстренный останов двигателей на земле и в полете, а также останов пожарным краном;

- авторотация;

- реверс тяги;

- управление в автоматическом режиме от системы ВСУТ-85;

- имитация неудачного запуска двигателей в диапазоне высот и скоростей, не оговоренных в «Руководстве по летной эксплуатации» (повышение температуры газа выше допустимой, зависание оборотов двигателя, автоматическое прекращение запуска при работоспособной системе регулирования двигателя, ускоренный запуск двигателей по сигналу с рабочего места инструктора).

Имитируются отказы: останов двигателя, помпаж двигателя, повышение температуры газов, отказ системы регулирования двигателя, вибрации двигателя, предельная температура газов вспомогательной силовой установки, разъединение управления двигателями, перегрев опоры, падение давления масла.

Метод моделирования позволяет обеспечить воспроизведение динамических характеристик в полном соответствии с «Нормами годности авиационных тренажеров для подготовки авиационного персонала воздушного транспорта».

Модуль имитатора акселерационных эффектов

Структурная схема приводится на рис. 5.

Предназначается для воспроизведения составляющих акселерационного поля [1, 5] информации, связанных с изменениями линейных перегрузок, угловых ускорений и перемещений, характерных для различных режимов полета, а также воспроизведения эффектов:

- постоянного ненаправленного «фонового» движения в процессе всего полета;

- вибрации от работающих двигателей;

- шумов от выпуска и уборки шасси;

- обжатия стоек шасси при торможении, растормаживании, а также эффектов, вызванных их касанием ВПП, включая раздельное касание носовой, левой и правой стойками;

- тряски при движении по ВПП;

- сваливания.

Позволяет одновременно имитировать пространственное маневрирование и движение, вызванное внешним воздействием.

Разработка динамических стендов (включая системы управления ими) осуществляется на основе компромисса между возможно более точным моделированием (в наземных условиях) акселерационных ощущений летчика и жесткими техническими ограничениями на максимальные линейные (в меньшей степени – на угловые) перемещения кабины стенда (во много раз меньшие реальных перемещений самолета). Точное моделирование акселерационных ощущений летчика во всем диапазоне частот принципиально невозможно – по линейным степеням свободы, а по угловым – затруднительно. Противоречие устраняется с использованием особенностей восприятия перегрузок летчиком. В имитаторе акселерационных эффектов воспроизводятся частоты 0,3–3 Гц. Задаваемые перемещения определяются с учетом их допустимого диапазона (независимо от способа формирования управляющих сигналов).

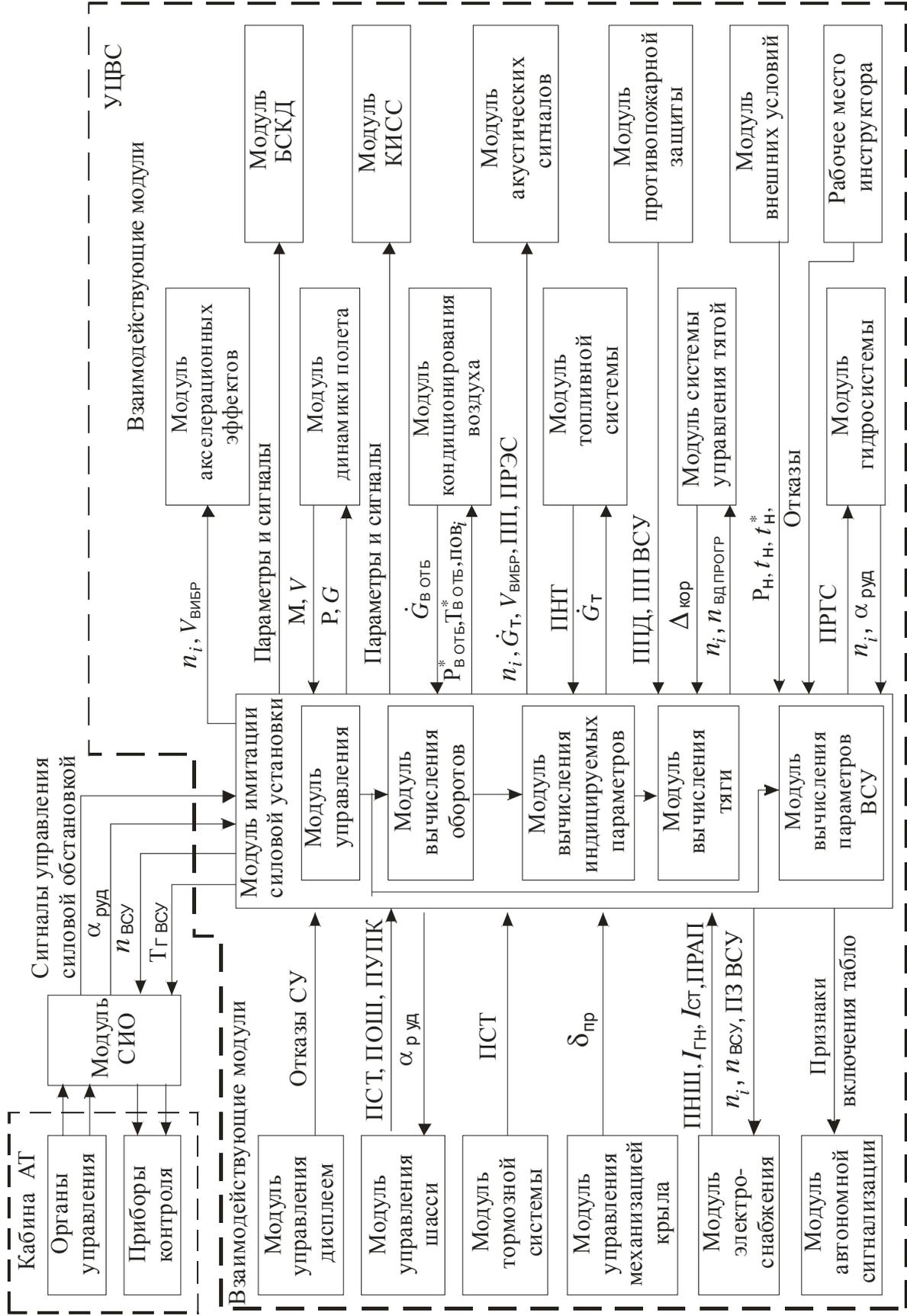


Рис. 4. Структурная схема модуля имитатора силовой установки



Рис. 5. Структурная схема модуля имитатора акселерационных эффектов

Для того чтобы при моделировании низких частот в изменении перегрузки кабина тренажера не только не выходила за ограничения по перемещению, но и незаметно для летчика стремилась вернуться в среднее, нейтральное положение, используются фильтры верхних частот. Воспроизведение на стенде длительно действующих линейных, боковых и продольных перегрузок (в диапазоне не более $\pm 0,5g$) обеспечивается возможностью наклона кабины на соответствующий угол. При разработке имитатора используются основы формирования ощущений наклонов у человека по реакциям отолитов, тактильных и кинестетических рецепторов. При разгоне и торможении самолета результирующая массовых сил, действующая на рецепторы, вызывает ощущение наклона по тангажу. Кабина тренажера наклоняется на соответствующий угол тангажа (линия горизонта на экране перед летчиком не изменяет своего положения). Аналогично строится имитатор для боковых перегрузок.

При имитации длительно действующих перегрузок учитывается взаимное расположение отолитового аппарата (в районе головы летчика) и центра вращения самолета (отолиты воспринимают перегрузки от возникающих при вращении центробежных сил). Одновременно с вращением подвижной платформы задаются линейные перемещения.

Как в канале крена, так и тангажа используются фильтры.

Таблица 1

Рабочие характеристики динамического стенда

Параметр движения	Диапазон перемещения	Максимальная скорость	Максимальное ускорение
Продольное (X)	$\pm 0,6$ м	$\pm 0,8$ м/с	± 8 м/с ²
Вертикальное (Y)	$\pm 0,5$ м	$+ 0,7 \div 0,8$ м/с	± 8 м/с ²
Боковое (Z)	$\pm 0,6$ м	$\pm 0,8$ м/с	$+ -8$ м/с ²
Крен (γ)	± 24 град	± 20 град/с	± 100 град/с ²
Тангаж (θ)	± 21 град	± 20 град/с	± 100 град/с ²
Рыскание (ψ)	± 23 град	± 20 град/с	± 100 град/с ²

Как следует из анализа данных табл. 1, получаемые характеристики динамического стенда удовлетворяют по своим параметрам, требующимся для адекватного моделирования авиационной обстановки.

Заключение

1. Рассматриваются методологические принципы создания авиационных тренажеров модульной архитектуры с использованием системного подхода.
2. Приводятся структура, состав, а также указываются взаимосвязи информационно-вычислительных систем тренажеров, предусматривающих распараллеливание вычислительных процессов.
3. Предлагаются варианты модульного построения тренажеров с разработкой основных модулей.
4. Результаты исследований использованы при разработке динамических стендов и комплексных тренажеров самолетов, широко используемых для подготовки летного состава в учебно-тренировочных центрах как гражданской, так и военной авиации.
5. Приведенные принципы разработки авиационных тренажеров могут использоваться при проектировании и других управляемых в пространстве динамических систем.

Список литературы

1. Методологические принципы проектирования сложных управляемых в пространстве динамических систем в приложении к разработке авиационных тренажеров / А. М. Данилов, А. Н. Анисимов, И. А. Гарькина, Б. В. Ключев, Э. В. Лапшин // III Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления SICPRO` 04» (Москва, 28–30 января 2004) / ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова. – М., 2004. – С. 279–311.
2. Авиационные тренажеры модульной архитектуры : моногр. / Э. В. Лапшин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина, Б. В. Ключев, Н. К. Юрков. – Пенза : Информ.-издат. центр ПГУ, 2005. – 148 с.
3. Динамика и управление внеатмосферными астрономическими обсерваториями / А. М. Данилов, Л. З. Дулькин, А. С. Земляков, В. М. Матросов, В. А. Стрельнев // Труды VI Международного симпозиума ИФАК по управлению в пространстве : в 2 т. Т.1. Управление в пространстве. – М. : Наука, 1976. – С. 153–171.
4. Данилов, А. М. Модульная архитектура пилотажных авиационных тренажеров на базе ПЭВМ / А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, В. Н. Шихалеев // Тренажеры и компьютеризация профессиональной подготовки тр. III Всесоюз. Науч.-техн. конф. – Калининград, 1991. – С. 21–22.
5. Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров / А. М. Данилов, Э. В. Лапшин // Приборы и системы управления. – 1989. – № 8. – С. 57–60.
6. Данилов, А. М. Некоторые критерии оценки пилотажных свойств летательных аппаратов / А. М. Данилов, И. А. Гарькина // Авиакосмические технологии АКТ – 2003 : тр. IV Рос. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2003. – Ч. 1. – С. 76–78.
7. Данилов, А. М. Влияние запаздывания в системах имитации физических факторов полета на пилотажные характеристики авиационных тренажеров / А. М. Данилов, И. А. Гарькина // IV Международная научно-техническая конференция «Кибернетика и технологии XXI». – Воронеж, 2004. – С. 43–45.
8. Безбогов, А. А. Современные авиационные тренажеры. Ч. 3. Моделирование акселерационной обстановки / А. А. Безбогов, Л. М. Дубовый, П. П. Зобков / Рижское высшее военное авиационное инженерное училище имени Якова Алксниса. – Рига, 1988. – С. 65–76.

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.
10. Кемалов, Б. К. К проблеме структурного синтеза моделирующей среды авиационного тренажера / Б. К. Кемалов, Б.Ж. Куатов, Н.К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 103–106.
11. Сухова, Ю. С. Особенности организации коммуникативного процесса обучаемого и интеллектуальной компьютерной обучающей системы / Ю. С. Сухова, С. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т.1. – С. 287–288.
12. Кемалов, Б. К. Формирование моделирующей среды авиационного тренажера / Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 9–16.

Лапшин Эдуард Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kibra@pnzgu.ru

Кемалов Берик Каирович

кандидат технических наук,
заместитель начальника департамента образования
и науки министерства обороны Республики Казахстан,
(010000, Казахстан, г. Астана, пр. Достык, 14)
E-mail: kemalov.bk@gmail.com

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)
E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru

Аннотация. Предлагаются методологические принципы создания авиационных тренажеров с использованием многопроцессорных информационно-вычислительных комплексов с распараллеливанием вычислительных процессов в реальном масштабе времени. Концепция модульности предполагает возможность объединения отдельных элементов без их влияния на систему в целом. При модульной архитектуре систем модули могут создаваться независимо друг от друга и объединяться в блоки для получения необходимых результатов. Многие элементы модульности используются в современных тренажерах. Объединение модулей традиционно требовало больших временных и финансовых затрат (иногда ожидаемая выгода не достигалась или требовались чрезмерные усилия). Так, во многих пилотажных приборах используются аналоговые данные, а в ряде других приборов и вычислителей используются цифровые данные. Налицо обмен в АТ большими потоками различной информации. Наибольшие трудности связаны с необходимостью выполнения всех операций в реальном масштабе времени. При модульном подходе модули и интерфейсы могут рассматриваться с функциональной точ-

Lapshin Eduard Vladimirovich

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

Kemalov Berik Kairovich

candidate of technical sciences,
deputy head of the department of education
and science of the Ministry of defence
of the Republic of Kazakhstan,
(010000, 14, Dostyk ave., Astana, Kazakhstan)

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'dinov
(463024, 16 A. Moldagulova avenue,
Aktobe, Kazakhstan)

Abstract. Methodological principles are proposed the establishment of flight simulators using multiprocessor computer complexes with parallelization of computing processes in real time. The concept of modularity involves the possibility of combining individual elements without their impact on the system as a whole. With the modular architecture of the systems modules can be created independently of each other and unite blocs to obtain the necessary results. Many of the elements used in modern modularity. Group modules have traditionally required a large amount of time and financial expenses (sometimes the expected benefit is not achieved or required excessive force). So many aerobatic devices use analog data, and in a number of other devices and calculators which use digital data. There was an Exchange in AT large variety of information flows. Most difficulties relate to all operations in real time. When the interface modules and modular approach can be seen from the functional point of view, or system is seen as a collection of hardware and software modules. Specified Division allows you to reach the main goal is to divide these levels so that changes on one level do not cause changes on the other. So, you can upgrade modules acceleration effects, visualizations, install other COMPUTERS, etc.

ки зрения или система рассматривается как набор аппаратных и программных модулей. Указанное разделение позволяет достичь основной цели – разделить указанные уровни так, чтобы изменения на одном уровне не вызывали изменений на другом. Так, можно модернизировать модули акселерационных эффектов, визуализации, установить другие ЭВМ и т.д. без изменения логической структуры АТ или, наоборот, использовать различные элементы физического уровня для создания конкретных АТ. Решение вопроса о взаимодействии модулей на самом деле является решением задачи передачи данных от модуля к модулю. Для их связи необходима схема сопряжения (в идеале – универсальная). Специального рассмотрения при модульном подходе требует вопрос программного обеспечения. Наибольшие усилия затрачены на обеспечение мобильности программного обеспечения. Доля стоимости математического обеспечения в общей стоимости АТ постоянно возрастает. Поэтому повышение эффективности труда программиста становится все более важным вопросом. Во избежание сложности внедрения технических новшеств требования к модулям, интерфейсу и другим не должны быть чрезмерно жесткими и замыкаться на существующих технологиях. Залог успеха – в создании достаточно гибких модулей и системы в целом. Модуль должен определяться функционально. Типы используемых ЭВМ, длина слов, язык программирования и т.п. не должны входить в определение модуля. При определении модулей, интерфейса, утверждении стандартов (для исключения разногласий) головная организация, координируя деятельность подрядчиков, должна исполнять роль эксперта. Рассмотренный подход использовался при разработке ряда комплексных тренажеров самолетов, широко используемых для подготовки летного состава в учебно-тренировочных центрах как гражданской, так и военной авиации.

Ключевые слова: авиационные тренажеры, модульность, программное обеспечение, имитаторы, технические средства обучения.

without changing the logical structure of AT or vice versa, use different elements of the physical layer to create a concrete AT. Solution to the issue of the interaction of modules is actually a solution for data transfer from module to module. Connect pairing scheme is needed (ideally-universal). Special consideration in the modular approach requires a software issue. The greatest efforts spent on mobility software. The proportion of the cost of the software in the total value of AB is constantly increasing. Therefore, improving programmer productivity is becoming increasingly important. To avoid the complexity of technological innovation requirements to modules, interface, etc. should not be excessively rigid and focus narrowly on existing technologies. The key to success is to create flexible modules and the system as a whole. The module should be defined functionally. Types of used computers, length of words, language and the like should not be included in the definition of the module. When defining the interface modules, approval standards (to exclude differences), the umbrella organization coordinating contractors must perform and the role of the expert. Considered approach was used to develop a number of aircraft simulators, widely used for training flight crews in training centers for both civil and military aviation.

Key words: aviation simulators, modularity, software, simulators, training means.

УДК 629.73.08

Лапшин, Э. В.

Проектирование авиационных тренажеров с распараллеливанием вычислительных процессов / Э. В. Лапшин, Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 128–141. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-18.