СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Бецков А. В.
О ВОЗМОЖНОЙ МОДЕЛИ УТРАТЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ АЭРОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 3

Кемалов Б. К., Куатов Б. Ж., Юрков Н. К.
ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЕРА 9

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Голованов О. А., Савицкий В. Я., Филиппов О. В.
ОПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОСФЕР 17

Юрманов В. А., Пискаев К. Ю.
АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ КВАНТОВАНИЯ ΣΔ-АЦП 24

Безродный Б. Ф., Майоров С. А.
К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБОК СЕЛЕКЦИИ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ 30

Юрманов В. А., Пискаев К. Ю.
УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОТ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В ИНТЕГРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ В ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ 38

Михеев М. Ю., Гудкова Е. А., Лепешев А. А.
ИНФОРМАЦИОННО-СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА ИНЕРЦИОННОГО ТИПА 43

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

Безродный Б. Ф., Михеев Е. А.
К ПРОБЛЕМЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОЕКТОВ 51

Маркелов В. В., Власов А. И., Зотьева Д. Е.
АВТОМАТИЗАЦИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА В СРЕДЕ MATLAB 58

Полтавский А. В., Юрков Н. К.
МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ 63

Твердохлебов В. А.
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ В КОНТРОЛЕ
И ДИАГНОСТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ 68

Щербань А. Б.
ДИАГНОСТИКА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА
ИХ СОСТОЯНИЙ 77

Володин К. И., Переходов А. И.
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТКИ
ВСТРАИВАЕМОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ 85

Доросинский А. Ю., Недорезов В. Г.
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ 91

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 629.7.075

О ВОЗМОЖНОЙ МОДЕЛИ УТРАТЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ АЭРОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. Бецков

В ходе выполнения целевых задач по обеспечению безопасности обслуживаемых объектов работоспособность системы аэромобильных комплексов специального назначения (далее – АМК) не является всегда однозначной. Как известно, строгого понятия «ресурс системы» не имеется, анализируется интуитивное понятие ресурса и его меры ξ, на которой строится теория расходования ресурса [1–3]. Поэтому вместо понятия ресурса будем характеризовать функционирование системы АМК ее работоспособностью. В качестве таких характеристик могут быть: вектор состояния параметров системы АМК, изменение вектора фазовых координат АМК, вектор возмущений параметров внешней среды, моменты отказов элементов (блоков, агрегатов) системы АМК и др. Причем моменты отказов будут являться основной причиной потери работоспособности АМК, на которую влияют множество причин и факторов. Поэтому мы будем исследовать потерю работоспособности системы АМК по причине ее отказов.

Обозначим моменты отказов системы АМК (или ее конкретного элемента) как ξ_i, $i = \overline{0, n-1}$. Если на систему АМК (элемента, изделия) производится какое-то воздействие в режиме ξ_i в течение времени τ, $\tau < \xi_i$, то продолжительность ее функционирования уменьшится и станет равной $\xi_i - \tau$, $\tau = \overline{0, n-1}$. Будем «изменять» моменты отказов в долях T_0 (средняя наработка на отказ).

При этом справедливо условие

$$M\xi_0 = 1. \tag{1}$$

Величину τ можно рассматривать как характеристику утраты системой АМК работоспособности. Зафиксируем произвольное значение $0 \le \tau \le t$ и определим характеристику утраты эффективности функционирования системы АМК на временном интервале $[\tau, t]$. Обозначим ее как $q(\tau; t; \xi_i)$. Очевидно, что

$$q(\tau; t; \xi_i) = \begin{cases} 0, \text{ если } \tau > \xi_i \\ \tau, \text{ если } \xi_i > \tau, \xi_i < \tau \\ t - \tau, \text{ если } \xi_i > \tau \end{cases}.$$

Усредним функцию $q(\tau; t; \xi_i)$, зависящую от случайной величины ξ_i. Тогда получим $M_q(\tau; t; \xi_i) = Q(\tau; t; \xi_i)$ – обобщенную характеристику утраты эффективности работоспособности

системы АМК на временном отрезке [τ, t] при воздействии на систему (изделие) в режиме ξ_i. Для определения показателя $Q(\tau; t; \xi_i)$ необходимо знать функцию распределения

$$F_i(t) = P(\xi_i < t),\ i = \overline{0,n,n-1}.$$

На практике, как правило, такая информация не известна [2]. Поэтому будем вместо $Q(\tau; t; \xi_i)$ выбирать другие характеристики $L(\tau; t; \xi_i)$, которые должны быть тесно связаны с $Q(\tau; t; \xi_i)$, являясь некоторым оператором, т.е. $L(\xi_i) = AQ(\xi_i)$, $i = \overline{0,n-1}$. Однако не все операторы подходят для решения задачи. Функции $L(\tau; t; \xi_i)$ должны также характеризовать безопасность функционирования системы АМК и удовлетворять следующим условиям. Чем больше значение $L(\tau; t; \xi_i)$, тем больше утрата безопасности системы (изделия) и, наоборот [3]. Поэтому будем предполагать, что функция $L(\tau; t; \xi_i)$ (где ξ_i – некоторый допустимый режим воздействия на систему (изделие)) удовлетворяет следующим условиям [4].

Обозначим $\overline{\mathrm{E}}$ – множество допустимых режимов воздействия на систему АМК, которое состоит из E и всех переменных режимов, составленных из исходных режимов $i \in E$. Рассмотрим. Пусть качество функционирования некоторой системы АМК характеризуется двумя параметрами x_1 и x_2. Наша задача – установить функциональную зависимость $\psi(x_1, x_2)$ между ними. Предположим, что имеется n систем и у каждой из них удалось получить количественные оценки параметров x_1 и x_2, т.е. получить информацию (x_1' и x_2'), где x_1' и x_2' – значение параметров соответственно x_1, x_2 i-й системы (изделия), $i = \overline{1,n}$. Если в пределах погрешности измерений точки (x_1', x_2') лежат на кривой, описываемой уравнением $\psi(x_1, x_2) = 0$, то между параметрами x_1 и x_2 существует функциональная зависимость $\psi(x_1, x_2) = 0$ (рис. 1,*а*,*б*), в противном случае – ее нет.

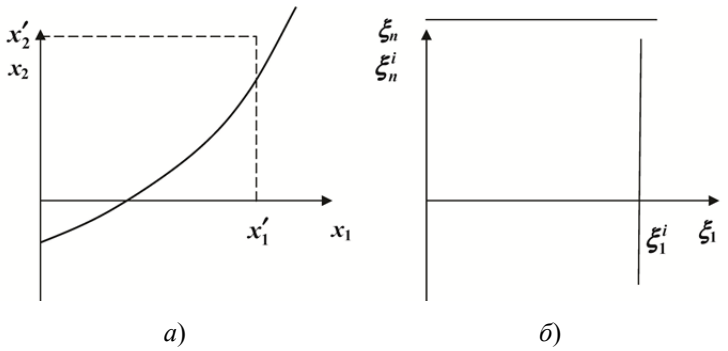


Рис. 1. Наблюдаемые и одновременно не наблюдаемые параметры

Представленный подход – это методология установления, является основной (доминирующей) в физике, химии, биологии и других областях науки. При интенсивных воздействиях на систему (изделие) такая методология не пригодна [5]. У исследуемой системы нельзя измерить моменты отказов $\xi_0(\omega_0)$ и $\xi_i(\omega_0)$. При воздействии на i-ю систему (изделие) с конструкторскими параметрами ω_0 в режиме ξ_1 можно определить момент отказа $\xi_1^i(\omega_0)$. Однако при этом система изменит свои первоначальные свойства (параметры ω_0) и для нее нельзя уже будет восстановить отказ $\xi_0(\omega_0)$. Таким образом, после воздействия на систему (изделие) можно получить значение одной координаты случайного вектора ($\xi_0(\omega_0)$, $\xi_i(\omega_0)$) (рис. 1,*б*). Аналогичная ситуация возникает, когда i-я система (изделие) функционирует в режиме воздействия ξ_1. В результате мы определим момент отказа $\xi_1(\omega_0)$, а вторая компонента случайного вектора ($\xi_1(\omega_0)$, $\xi_0(\omega_0)$) будет неизвестна. Параметры $\xi_1(\omega_0)$ и $\xi_0(\omega_0)$ называют одновременно наблюдаемыми.

1. Анализ аддитивности системы уравнений

Рассмотрим условие аддитивности.

При любом $\theta \in (\tau, t)$ справедливо равенство

$$L(\tau, t; \xi) = L(\tau, t; \xi) + L(\theta, t; \xi).$$

Отсюда вытекает более общее соотношение

$$L(\theta_1, \theta_n; \xi) = \sum_{i=2}^{n} L(\theta_{i-1}, \theta_i; \xi); \ \ \xi \in \overline{\mathrm{E}} \tag{2}$$

при любых $\theta_1 \le \theta_2 \le \ldots \le \theta_n$.

2. Условие соблюдения марковского процесса

Условие марковости в нашем определении следующее.

Функция $L(\tau, t; \xi)$ зависит от величины выработанного ресурса в прошлом $L(0, \tau; \xi)$ за время τ и не зависит от того, каким образом выработан этот ресурс – в каком режиме (возможно целенаправленное агрессивное воздействие на систему) [6, 7]. В формализованном представлении это условие можно записать в следующем виде.

Если $L(0, \theta; \xi_2) = L(0, \tau; \xi_1)$, то $L(\theta, \theta + t; \xi) = L(\tau, \tau + t; \xi)$, $\xi \in \overline{\mathrm{E}}$. Для удобства последующих исследований целесообразно сделать следующие преобразования.

1. Понизить размерность функции $L(0, t; \xi)$, введя скорость утраты работоспособности системы в результате агрессивного на нее воздействия:

$$\mu(t, \xi) = \frac{L(0, t; \xi)}{dt}.$$

Тогда функцию $L(\tau, t; \xi)$ можно представить в виде

$$L(\tau, t; \xi) = \int_{\tau}^{t} \mu(t, \xi) dt.$$

2. Вместо моментов отказов ξ будем использовать правило $\upsilon(\xi)$, согласно которому считаем, что система неработоспособна. Правило $\upsilon(\xi)$ имеет размерность t и является случайной величиной.

Обозначим $H(t, \xi) = P(\upsilon(\xi) < t)$ – его функция распределения. Рассмотрим уравнение, описывающее процесс утраты работоспособности системы (изделия). Предположим, что

$$ML(0, \upsilon; \xi) = 1 \ \forall \xi_i \in E. \tag{3}$$

Если

$$ML(0, \upsilon; \xi_i) = c_i > 0, \ c_i \ne 1, \ i = \overline{0, n-1},$$

то вместо $L(0, \upsilon; \xi_i)$ введем другую характеристику потери работоспособности системы $L(0, \upsilon; \xi_i) / c_i$, которая будет удовлетворять условию (3). Дополнительное ограничение состоит в том, что нормировка (3) справедлива не только для $\xi_i \in E$, но и для всех возможных режимов воздействия на систему, т.е.

$$ML(0, \upsilon; \xi_i) = \int_{0}^{+\infty} L(0, \upsilon; \xi_i) dH(\upsilon, \xi) = 1 \forall \xi \in \overline{\mathrm{E}}. \tag{4}$$

Будем считать, что потеря работоспособности системы АМК предполагает динамическую или потенциальную (статическую) опасность. Воспользуемся методом, предложенным в [1]:

$$L(0, \upsilon; \hat{\xi}) = L(0, \upsilon; \xi_0) \text{ при } 0 \le \upsilon \le t_1. \tag{5}$$

Если $t_1 \le \upsilon \le t_2$, то это означает, что на систему (изделие) действует более жесткий режим ξ_1. Продолжительность τ этого режима определяется из равенства

$$L(0, \tau_1; \xi_1) = L(0, t; \xi_0). \tag{6}$$

Используя свойства аддитивности и марковости, определим утрату работоспособности системы в промежутке [0, η]. Предварительно заметим, что η – это правило прекращения функционирования системы, зависящей от моментов отказов элементов (агрегатов) системы и их функций распределения, что однозначно определяется скоростью утраты работоспособности η (t, ξ) (условие (2)). Таким образом, суммарная потеря работоспособности системы (изделия) на интервале [0, η] будет определяться как

$$L(0, \upsilon; \xi) = L(0, \tau_1; \xi_1) + L(\tau, \upsilon; \xi_1) = L(0, \upsilon - t_1 + \tau_1; \xi_0) \text{ при } t_1 \le \upsilon \le t_2. \quad (7)$$

На рис. 2 иллюстративно представлены режимы воздействия на систему АМК при ее функционировании.

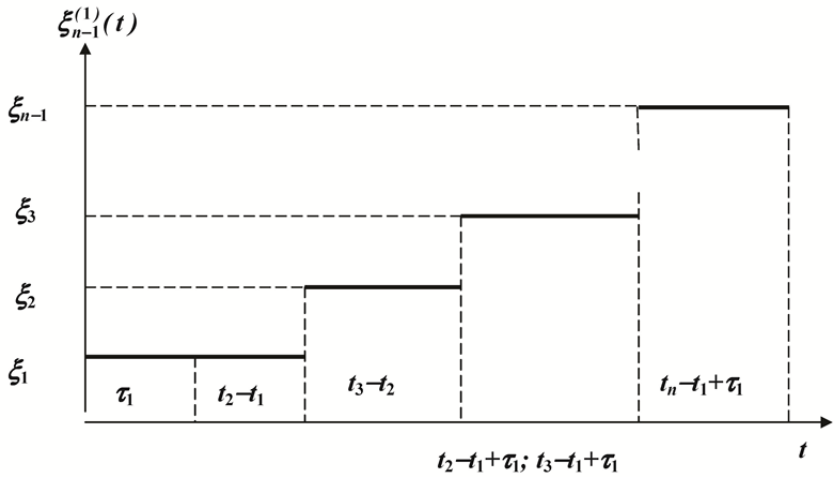


Рис. 2. Преобразованный режим воздействия на систему АМК с $n-1$ ступенями

Аналогично поступим при $\upsilon \in [t_2, t_3]$. Первую ступень режима воздействия на систему (изделие) $\xi_{n-1}^{(1)}(t)$ заменим на эквивалентную по утрате работоспособности в режиме ξ_2. Продолжительность воздействия τ_2 находится из равенства

$$L(0, t_2 - t_1 + \tau_1; \xi_1) = L(0, \tau_2; \xi_2). \quad (8)$$

Снова используя условия (1) и (2), запишем суммарную утрату работоспособности на временном промежутке [0, υ] в виде

$$L(0, \upsilon; \hat{\xi}) = L(0, \tau_2; \xi_2) + L(\tau_2 - t_1 + \tau_1, \upsilon - t_1 + \tau_2; \xi_2) = L(0, \upsilon - t_2 + \tau_2; \xi_2),\ t_2 \le \upsilon < t_3. \quad (9)$$

После замены первой ступени в $\hat{\xi}_{n-2}^{(1)}$ на эквивалентную согласно (9) получим переменный режим воздействия на систему (изделие) как $\hat{\xi}_{n-2}^{(2)}(t)$ с $n-2$ ступенями (рис. 3).

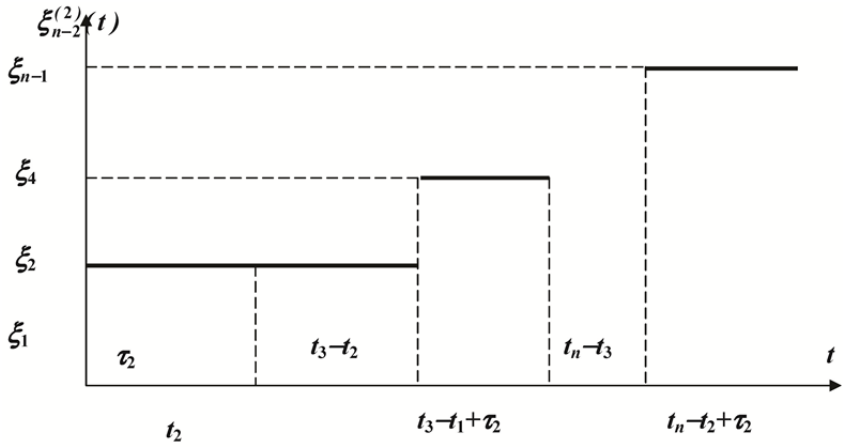


Рис. 3. Иллюстрация переменного режима воздействия $\hat{\xi}_{n-2}^{(2)}$

Исходя из (1–3), методом математической индукции можно получить выражение для $L(0, \upsilon; \hat{\xi})$ при любых $\upsilon \in (t_j, t_{j+1}), j = \overline{0, n-1}, t_n = +\infty$:

$$L(0, \upsilon; \hat{\xi}) = \sum_{k=1}^{j} L(\tau_k, t_{k+1} - t_k + \tau_k; \xi_k) + L(\tau_j, \upsilon - t_j + \tau; \xi_j). \quad (10)$$

Значения t_j определяются из рекуррентных выражений

$$L(0, \tau_i; \xi_{i+1}) = L(0, t_i - t_{i-1} - \tau_{i-1}; \xi_{i-1}), \quad (11)$$

$$i = 0, 1, \ldots, \tau_0 = t_0 = 0.$$

Введем функцию

$$\psi(t, \tilde{\xi}) = \begin{cases} 0, 0 \le t < t_1 \\ \tau_1, t_1 \le t < t_2 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \end{cases},$$

$$\psi(t, \tilde{\xi}) = \begin{cases} 0, 0 \le t < t_1 \\ t_1, t_1 \le t < t_2 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \end{cases}$$

и

$$P(t, \tilde{\xi}) = G(t, \tilde{\xi}) - \psi(t, \tilde{\xi}) + t.$$

Тогда (10) и (11) можно представить в виде

$$L(0, \upsilon; \hat{\xi}) = \int_0^{\upsilon} \mu(P(t, \hat{\xi}), \xi_t) dt = L(0, P(\upsilon, \tilde{\xi}); \tilde{\xi}_t). \quad (12)$$

Здесь $\tilde{\xi}_t$ означает режим $\xi \in E$, в котором система функционировала в момент времени ***t***.

После замены в (4) характеристики $L(0, \upsilon; \xi)$ на правые части (12) получим два уравнения, описывающие процесс утраты работоспособности системы при воздействии на нее любого переменного режима

$$\int_0^{\infty} dH(\upsilon, \hat{\xi}) \int_0^{\upsilon} \mu(P(t, \tilde{\xi}_t) dt = 1,$$

$$\int_0^{\upsilon} L(0, P(\upsilon, \tilde{\xi}), \tilde{\xi}) dH(\upsilon, \hat{\xi}) = 1.$$

Исходя из полученных результатов уравнений, можно судить о состоянии работоспособности и о процессе утраты его во времени и под воздействием некоторых внешних факторов.

Список литературы

1. Северцев, Н. А. Введение в безопасность / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М. : Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук, 2008. – 176 с.
2. Юрков, Н. К. Безопасность сложных технических систем / Н. К. Юрков // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 129–134.
3. Юрков, Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21.
4. Северцев, Н. А. Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009. – 452 с.

5. Северцев, Н. А. Метод оценки показателей безопасности автономных динамических систем / Н. А. Северцев, А. Н. Катулев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 17–26.
6. Обеспечение готовности аэромобильного комплекса в условиях внешней угрозы / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, Ю. В. Лончаков, И. В. Прокопьев // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 1. – С. 68–69.
7. Северцев, Н. А. К вопросу об утрате работоспособности систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. М. Самокутяев // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 2. – С. 267–269.

Бецков Александр Викторович
доктор технических наук, доцент,
кафедра управления органами внутренних дел
в особых условиях,
Академия управления МВД России,
(125171, Россия, г. Москва,
ул. Зои и Александра Космодемьянских, д. 8)
(499) 745-95-20
E-mail: abckov@mail.ru

Betskov Aleksandr Viktorovich
doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of management bodies of internal
affairs in the special conditions,
Russian Academy of the interior Ministry
(125171, 8 Zoy and Alexander Kosmodemianskys
street, Moscow, Russia)

Аннотация. В статье предложены подход и модели утраты работоспособности системы аэромобильных комплексов (АМК) специального назначения, влияющие на безопасность функционирования на основе аддитивно-марковских моделей расходования ресурса. При этом вместо понятия ресурса системы АМК используется ее работоспособность, а именно: вектор состояния параметров системы АМК, изменение вектора фазовых координат АМК, вектор возмущений параметров внешней среды, моменты отказов элементов (блоков, агрегатов) системы АМК и др. Считаем, что моменты отказов являются основной причиной потери работоспособности АМК. Проводится анализ потерь работоспособности системы АМК по причине ее отказов.

Ключевые слова: аддитивность, система аэромобильных комплексов специального назначения, работоспособность, вектор состояния параметров, вектор фазовых координат, вектор возмущений параметров внешней среды, отказ системы, интенсивность возмущений, метод математической индукции.

Abstract. The article suggested approach and model of system health airborne systems (AMK) special forces that affect the safety of operations on the basis of the expenditure patterns of Markov additive-resource. The resource system instead of the AMK is its operation, namely, the State vector of the system settings change the vector of phase, the AMK coordinates the AMK, vector perturbations of environmental parameters, moments of failures of elements (blocks, aggregates) system of the AMK, etc. Believe that moments of failure is the major cause of loss of efficiency the AMK. Analysis of the loss of efficiency of the AMK because of its failure.

Key words: additivity, the system of special-purpose systems, airborne operation, the vector of parameters, the vector of phase perturbation parameter, the vector of coordinates, vector perturbations of environmental parameters, system failure, the intensity perturbation, a method of mathematical induction.

УДК 629.7.075
Бецков, А. В.
О возможной модели утраты работоспособности системы аэромобильных комплексов специального назначения / А. В. Бецков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 3–8.

УДК 623.746

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЕРА

Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов, Н. К. Юрков

Совокупность моделирующей среды и программного обеспечения авиационного тренажера (АТ) есть определенный аппаратно-программный продукт, выполняющий заданные функции по имитации самого летательного аппарата, его бортовых систем и окружающей среды в реальном масштабе времени.

Рациональное построение этого продукта влечет за собой повышение эффективности использования вычислительных средств, надежности авиационного тренажера, адекватности реализованных характеристик заданным, преемственности, скорости разработки, гибкости конфигурирования авиационных тренажеров разной степени сложности и применения [1].

Поэтому структура моделирующей среды и программного обеспечения авиационного тренажера с полным основанием может рассматриваться как объект самостоятельного исследования с целью ее дальнейшего совершенствования.

Структурный анализ сложной технической системы

Структурный синтез моделирующей среды авиационного тренажера проводится на основе комплексного анализа проблемы по следующим направлениям [2]:

– анализ дерева узлов вычислительной системы по их функциональному назначению;

– анализ информационных потоков между узлами и функциональными группами узлов в вычислительной системе;

– анализ соответствия выбранных средств вычислительной техники, реализующих узлы вычислительной системы, их функциональному соответствию;

– анализ выбора аппаратных средств сопряжения узлов в вычислительную систему;

– анализ соответствия характеристик работы отдельных узлов и всей вычислительной системы в целом заданным;

– анализ степени автономности узлов и функциональных групп узлов друг от друга;

– анализ надежности вычислительной системы;

– анализ структуры баз данных и средств поиска информации в них;

– анализ степени стандартизации и унификации, возможности преемственности;

– анализ гибкости и возможности реконфигурации;

– экономико-эргономический анализ.

Анализ дерева узлов моделирующей среды и информационных потоков в ней проведем на основе рассмотрения авиационного тренажера как объединения программно-аппаратных модулей, несущих четко определенные, унифицированные функции (модуль динамики полета, модули отдельных самолетных систем, модули навигации и т.п.) с регламентированным интерфейсом между ними.

В связи с частой сменой средств вычислительной техники моделирующая среда должна представлять собой реализацию логико-информационной схемы среды, которая определяется логико-функциональным подходом к сложным техническим системам, в том числе АТ [3].

Анализ соответствия выбранных вычислительных средств и средств сопряжения их функциональному назначению будем проводить с точки зрения их производительности, надежности и стоимости.

Анализ степени автономности узлов и их функциональных групп необходимо вести с учетом того, что каждый функциональный модуль моделирующей среды суть элемент специализированного или функционального тренажера. При автономной работе каждый модуль должен со-

здавать (генерировать) ту совокупность информации, которую он получает от смежных модулей, работая в комплексном режиме. Кроме того, автономность подразумевает возможность функционирования тренажера при отказе одного или нескольких модулей.

Анализ баз данных ведется с целью определения рациональности их организации для простоты и быстроты поиска информации в них.

Анализ степени стандартизации и унификации, возможности преемственности проводится с точки зрения обеспечения разработки и модернизации ряда авиационных тренажеров в сжатые сроки. Это должно проявляться при моделировании реальных систем летательного аппарата в выделении функционально-устойчивых ядер этих систем и тщательного моделирования этих ядер и конструктивного, часто меняющегося оформления.

Анализ гибкости и возможности реконфигурации должен проводиться с целью определения требуемых изменений в моделирующей среде и программном обеспечении при замене моделируемых систем или заданных характеристик. Во всяком случае, изменения внутри одного программно-аппаратного модуля не должны вести к изменениям других модулей. Кроме того, должна обеспечиваться возможность набора требуемой вычислительной системы из программно-аппаратных модулей разной степени сложности [4, 5].

Концепция модульности подразумевает свойство систем, в соответствии с которым отдельные ее элементы (модули) могут быть объединены, разделены и модифицированы без влияния на систему в целом и на другие модули.

Модульная структура авиационного тренажера

Модульный авиационный тренажер отличается от обычных современных АТ с «монолитной» структурой тем, что его функции разделены между несколькими четко определенными модулями, связанными друг с другом по унифицированной схеме. Эти модули должны выдавать и получать информацию, необходимую для работы тренажера. Каждый модуль может быть выполнен в различных вариантах, но интерфейсы между модулями должны быть стандартными.

При переходе на модульную концепцию западными фирмами, прежде всего, учитывается фактор «товарности» модуля, т.е. свойство модулей, согласно которому они могут создаваться и продаваться независимо друг от друга. В этом смысле «товарностью» уже обладают такие модули, как кабина, система подвижности, система визуализации, пульт инструктора. «Товарные» модули покупаются головной фирмой, производящей тренажеры, и объединяются на ней в законченное изделие (тренажер). Очевидно, что головная фирма заказывает и получает «товарные» модули для создания тренажера под конкретный вид ЛА.

Так как все без исключения модули обладают стандартным интерфейсом, головная фирма имеет возможность выбора и выбирает тот модуль (из предлагаемых изделий одного функционального назначения), который обладает лучшим соотношением «затраты/прибыль». Итак, одно из преимуществ модульности – независимость его создания, производства, т.е. «товарность». К преимуществам модульности относится также гибкость модуля, т.е. модуль может быть реорганизован для удовлетворения различным требованиям, например, введение дополнительных требований по реализации автономной тренировки, имитации дополнительных отказов.

Следующим преимуществом модульности является модифицируемость, т.е. модуль может быть изменен с целью отражения в нем изменений, связанных с реальным моделируемым объектом. При модификации модуля воздействие его на другие модули и систему в целом должно быть минимальным [6, 7].

В настоящее время сложно дать ответ на то, какой тренажер будет дешевле – модульный или с «монолитной» структурой. Потребуются дополнительные затраты для того, чтобы каждый создаваемый модуль отвечал поставленным требованиям. С другой стороны, объединение таких модулей, возможно, повлечет за собой быстроту исполнения и уменьшение стоимости.

При создании первого модульного тренажера невозможно добиться всех тех преимуществ, которые присущи модульному подходу. Эти преимущества заключаются в разработке тренажеров на базе существующих модулей. В этом случае экономия по времени создания и стоимости может быть большой.

При модульном подходе система, составленная из взаимосвязанных элементов, не может достигнуть полной модульности. Однако всегда можно получить некоторую степень модульности.

Модульный тренажер должен иметь модульную моделирующую среду и модульное программное обеспечение. Реально модуль вычислительной системы – это один или несколько функционально связанных ее узлов со стандартным логико-информационным интерфейсом со смежными модулями этой системы.

Чтобы определить модуль, т.е. определить его функции, необходимо определить входные связи, т.е. информацию, подлежащую обработке, выходные связи, частоту обмена информацией и т.п., другими словами, модуль должен быть определен функционально. Типы используемых ЭВМ, программное обеспечение не должны входить в определение модуля, это его конкретная реализация.

Должны быть полностью определены связи между модулями моделирующей среды, должны быть определены требования, определяющие разработку и внедрение модулей и элементов интерфейса [8, 9].

Эти понятия: определение, взаимосвязь и требования – являются главными в модульном подходе, и только полное их решение дает возможность успеха.

Переход к модульной структуре должен охватывать всю вычислительную систему.

Незавершенный, несогласованный модульный подход не дает никакого выигрыша, хотя и требует больших затрат на разработку по сравнению с «монолитным» подходом.

Наибольшая потенциальная опасность заключается в желании выбрать узкоспециальный подход, который жестко определяет архитектуру ЭВМ, жестко устанавливает структуру интерфейсов, диктует применение специального языка программирования.

Удачный модульный подход должен рассматривать все эти аспекты единым всеобщим образом. Он должен быть наиболее гибким и способным на некоторые исключения или отклонения без ущерба подхода в целом.

Поэтому модульный подход необходимо рассматривать на двух уровнях: логическом, на котором модули и интерфейс рассматриваются с функциональной стороны, и физическом, на котором моделирующая среда рассматривается как набор аппаратных и программных модулей. Основная цель данного рассмотрения – разделить эти уровни до такой степени, что изменение на физическом уровне не влечет за собой изменения на логическом уровне.

Классическими примерами логического уровня являются математическая модель системы решения навигационных параметров и математическая модель аэродинамики летательного аппарата. На этом уровне рассматриваются вопросы точности, объекты моделирования, входная и выходная информация модуля.

Языки программирования, характеристики ЭВМ, среда передачи информации не обсуждаются на логическом уровне.

Физический уровень – это среда, в которой функционируют логические модули и посредством которой они взаимодействуют. На этом уровне рассматриваются вопросы производительности аппаратных средств, их архитектура, системы программирования и собственно программы [10, 11].

Такое распределение позволяет достаточно гибко модернизировать модули на физическом уровне, не затрагивая логического. Можно использовать различные элементы физического уровня для создания конкретного тренажера.

Вычислительная система авиационного тренажера

Программы, лежащие в модуле вычислительной системы, сами представляют собой программный модуль. Этот модуль должен разрабатываться на логическом уровне и реализовываться на физическом. Программный модуль представляет собой некоторую иерархическую структуру более мелких программных модулей с той или иной степенью вложенности. Модульная программа – это логически структурированная программа, в которой любую часть логической структуры можно изменить, не вызывая изменений в остальных частях программы. Конечно, абсолютная независимость модулей недостижима. Они как-то связаны друг с другом. Нужно лишь стремиться, чтобы эти связи были минимальными или хотя бы четко оговоренными. Взаимосвязь или так называемое сцепление модулей классифицировано в табл. 1.

Таблица 1

Сцепление модулей ПО АТ

Системная характеристика модуля	Вид сцепления	Мера сцепления
1. Модуль не содержит о другом модуле никакой информации (слабое сцепление)	Независимое	0
2. Вызывающий модуль имеет имя вызываемого модуля, а также типы и значения некоторых его переменных	Данные	1
3. Параметры модуля содержат сведения о внутренней структуре данных	Образец	3
4. Модули разделяют одну и ту же глобальную структуру данных	Общая область	4
5. Один модуль имеет данные о внутренних функциях другого и управляет решениями внутри другого с помощью передач флагов, переключателей или кодов, предназначенных для выполнения функций управления	Управление	5
6. Модуль имеет доступ к данным в другом модуле через внешнюю точку входа	Внешние ссылки	5
7. Модули кодов команд, которые перемежаются друг с другом (сильное сцепление)	Коды	7

Когда говорится о независимости программного модуля, имеется в виду, что один или несколько определенных программных факторов тоже будут независимыми, например [12]:

– логическая структура программы;
– аргументы или параметры модуля;
– внутренние переменные, таблицы и константы;
– структура и формат базы данных;
– модульная структура управления программой.

Предполагая эти факторы неизменными, можно требовать независимость отдельных модулей программы. Если интерфейсы между модулями определены, то в этом случае можно заменять модуль функционально ему эквивалентным, не вызывая при этом никаких последствий ни в каком другом модуле программы.

Нет единых законов разделения программы на модули. Их можно делать более мелкими, например, требуя, чтобы объем модуля был не более 50 операторов языка высокого уровня, или более крупными, объединять несколько функций в один модуль, из модуля обращаться к другим модулям и т.д. Характеристикой модуля по его внутреннему содержанию является связность. По связности модули ПО АТ классифицированы в табл. 2.

Таблица 2

Связность модулей ПО АТ

Системная характеристика модуля	Вид связности	Мера связности
1. Выполняет единственную функцию. Модуль типа вход – преобразователь – выход. Не может быть разбит на несколько других модулей, имеющих связность такого же уровня	Функциональная (сильная связь)	10
2. Модуль может быть разбит на части, выполняющие независимые функции, которые совместно реализуют единственную функцию (оценка и обработка данных)	Информационная (последовательная)	9
3 Модуль, состоящий из независимых модулей, разделяющих структуру данных. Общая структура данных является основой его организации. Запоминание и поиск данных	Коммуникативная	7
4. Модуль последовательно выполняет набор функций, непосредственно относящихся к процедуре решения задачи	Процедурная	5
5. Модуль содержит части, функционально не связанные в один и тот же момент обработки	Временная (по классу)	3
6. Модуль объединяет операторы по принципу их функционального подобия, а для его настройки используется алгоритм переключения	Логическая	1
7. Объединение в модуль абсолютно не связанных частей ПО	По совпадению	0

Достоинствами модульности в программировании являются:

а) модульные программы легко составлять и отлаживать. Функциональные компоненты такой программы могут быть написаны и отлажены порознь;

б) модульную программу легче сопровождать и модифицировать. Функциональные компоненты могут быть изменены, переписаны или заменены без изменений в остальных частях;

в) разработкой модульной программы легче управлять.

К недостаткам модульного подхода в программировании можно отнести:

а) модульность часто требует большой дополнительной работы;

б) модульный подход часто требует дополнительных затрат времени центрального процессора;

в) модульный подход часто требует дополнительные ресурсы оперативной памяти.

Но эти недостатки часто переходят в достоинства из-за преемственности модулей, возможности их тщательной разработки, применения библиотечных программ, минимизированных по времени выполнения или памяти стандартных процедур и функций [13, 14].

Концепция модульности моделирующих сред авиационных тренажеров требует разработки формальных методов выделения отдельных модулей, как правило, основанных на теории графов и теории цепей.

Распределение программных модулей по узлам моделирующей среды

Требуется распределить N взаимодействующих программных модулей по M узлам моделирующей среды с минимальным количеством параметров обмена между ними. При этом суммарное время выполнения программных модулей в каждом узле не должно превышать некоторое T_i.

Количество параметров обмена между отдельными программными модулями задается матрицей смежности A размерностью $(n \times n)$, время выполнения программных модулей вектором $B(n)$.

Для построения формальной математической модели распределения удобно использовать теорию графов. При этом пакет программных модулей интерпретируется как ненаправленный мультиграф (т.е. граф у которого существует хотя бы одна пара вершин, соединенных m ребрами), в котором каждому программному модулю соответствует вершина мультиграфа, а параметрам обмена – его ребра.

Тогда задача распределения программных модулей по узлам вычислительной сети формулируется следующим образом.

Задан мультиграф $G(X,U)$. Требуется «разрезать» его на отдельные подграфы так, чтобы число ребер, соединяющих эти подграфы, было минимальным, т.е. минимизировать

$$\sum_{i=1(i\neq j)}^{k} \sum_{j=1}^{k} U_{ij} \quad \text{для } \forall G_i(X_i U_i) \subset G(X,U) \ .$$

Из $G_i(X_i,U_i) \neq G_j(X_j,U_J)$ следует, что $X_i \bigcap X_j = 0,\ U_i \bigcap U_{ij} = 0$, где U_{ij} – множество ребер, соединяющих подграфы $G_i(X_i,U_i)$ и $G_j(X_j,U_j)$. Ограничением в рассматриваемой задаче является суммарное время выполнения программных модулей для каждого узла.

Известные алгоритмы распределения можно условно разбить на пять групп: алгоритмы, использующие методы целочисленного программирования; последовательные алгоритмы; итерационные алгоритмы; смешанные алгоритмы; алгоритмы, основанные на методе ветвей и границ.

Алгоритмы первой группы хотя и позволяют получить точное решение задачи, однако для мультиграфа реальной сложности практически не реализуемы на ЭВМ.

В отечественном тренажеростроении наибольшее распространение получили приближенные алгоритмы распределения (последовательные, итерационные, смешанные).

При использовании последовательных алгоритмов сначала по определенным правилам выбирают первую вершину графа, затем осуществляют последовательный выбор вершин (из числа нераспределенных) и присоединение их к формируемому узлу графа. После образования первого узла переходят ко второму и т.д. до получения желаемого разрезания исходного графа.

В итерационных алгоритмах начальное разрезание графа на куски выполняется произвольным образом: оптимизация компоновки достигается парными или групповыми перестановками

вершин графа из различных кусков. Процесс перераспределения вершин заканчивают при получении локального экстремума целевой функции, удовлетворяющего требованиям разработчика.

В смешанных алгоритмах распределения для получения начального варианта «разрезания» используется алгоритм последовательного формирования кусков; дальнейшая оптимизация решения осуществляется перераспределением вершин между отдельными кусками графа.

В последовательных алгоритмах распределения «разрезание» исходного графа $G(X, U)$ на модули $G_i(X_i, U_i), (i+1, ..., k)$ сводится к следующему.

В графе $G(X,U)$ находят вершину $X_i \in X_i$ принадлежащую X с минимальной локальной степенью $p(X_i) = \min p(X_f)$, для всех X_f, принадлежащих X, где $p(X_f)$ равен сумме A_{fp} (p=1,...,N).

Если таких вершин несколько, то предпочтение отдается вершине с максимальным числом кратных ребер. Из подмножества вершин, смежных с вершинами формируемого куска графа $G_1(X_1, U_1)$, выбирают ту, которая обеспечивает минимальное приращение связей куска с еще нераспределенными вершинами $d(X_j) = \min d(X_r)$ (для всех X_r принадлежащих X_s), где $d(X_r) = p(X_r) - 2$ (сумма A_{re} принадлежит E).

Данную вершину X_j, принадлежащую X/X_1, включают в $G_1(X_1,U_1)$, если не происходит нарушение ограничения по сумме времени выполнения программных модулей узла, т.е. если X_j принадлежит ΓX_1 & $d(X_j) = p(X_j) - 2$ (сумма A_{je} принадлежит E) = min $d(X_r)$ (X_r принадлежит ΓX_1) & сумма TIME(X_g) (g принадлежит объединению j и E и не больше m], тогда X_j включается в X_1, где A_{je} – элемент матрицы смежности исходного графа $G(X,U)$; $d(X_g)$ – относительный вес вершины X_g, равный приращению числа внешних ребер куска $G_1(X_1, U_1)$ при включении вершины X_g во множество X_1; E – множество индексов вершин, включенных в формируемый кусок графа на предыдущих шагах алгоритма; m – максимально допустимое суммарное время выполнения программ для отдельно взятого узла.

Указанный процесс продолжается до тех пор, пока присоединение очередной нераспределенной вершины X_j к узлу $G_1(X_1,U_1)$ не приведет к нарушению ограничения по времени выполнения программных модулей для данного узла.

После образования первого узла процесс повторяется для формирования второго, третьего и т.д. с той лишь разницей, что рассмотрению подлежат только вершины, не вошедшие в предыдущие узлы.

Достоинством последовательных алгоритмов является простота их реализации на ЭВМ и высокое быстродействие.

Недостатком этих алгоритмов является получение результатов, которые в общем случае могут быть далекими от оптимальных, что сужает область их использования.

Заключение

Таким образом, представлено рациональное построение моделирующей среды и программного обеспечения авиационного тренажера. Обоснована необходимость комплексного анализа проблемы структурного синтеза сложной технической системы, построенной на основе модульного принципа конструирования.

Список литература

1. Юрков, Н. К. Синтез системы управления интеллектуальной компьютерной обучающей системой / Н. К. Юрков, А. В.Затылкин, Б. К. Кемалов // Новые промышленные технологии. – 2011. – № 2. – С. 58–61.
2. Юрков, Н. К. Синтез автоматизированной системы оценивания качества пилотирования на авиационном тренажере / Н. К. Юрков, А. И. Годунов, Ю. Г. Квятковский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 58–64.
3. Юрков, Н. К. Синтез управления движением мобильного робота по траектории методом интеллектуальной эволюции / Н. К. Юрков, А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 1. – С. 188–190.
4. Принципы создания сквозных управляемых динамических систем применительно к авиационным тренажерам / Н. К. Юрков, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, И. А. Гарькина // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2004. – № 2. – С. 53–57.

5. Юрков, Н. К. Проблемы развития авиационного тренажеростроения / Н. К. Юрков, Э. В. Лапшин, А. В. Блинов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 1999. – № 3. – С. 33–39.
6. Юрков, Н. К. Информационные модели проектирования интеллектуальных тренажеров широкого профиля / Н. К. Юрков, Э. В. Лапшин, А. В. Блинов // Измерительная техника. – 2000. – № 8. – С. 23–27.
7. Принципы создания сквозных управляемых динамических систем применительно к авиационным тренажерам / Н. К. Юрков, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, И. А. Гарькина // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2004. – № 2. – С. 53–57.
8. Авиационные тренажеры модульной архитектуры : моногр. / Э. В. Лапшин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина, Б. В. Клюев, Н. К. Юрков. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 148 с.
9. Юрков, Н. К. Состояние и перспективы развития авиационного тренажеростроения / Н. К. Юрков, Э. В. Лапшин // Информационные технологии в образовании, науке и производстве : сб. тр. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. (Серпухов, 30 июня – 4 июля 2008 г.). – Серпухов, 2008. – С. 554–565.
10. Лысенко, А. В. Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 2. – С. 155–158.
11. Юрков, Н. К. Моделирование прогнозно-оптимизационной деятельности оператора авиационного тренажера / Н. К. Юрков, Б. К. Кемалов // Computer – based conference : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Пензенская государственная технологическая академия, 2011. – Вып. 14. – С. 102–108.
12. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
13. Юрков, Н. К. Обеспечение комплексной адекватности авиационных тренажеров / Н. К. Юрков, А. И. Годунов, Б. К. Кемалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 15–24.
14. Юрков, Н. К. Синтез автоматизированной системы оценивания качества пилотирования на авиационном тренажере / Н. К. Юрков, А. И. Годунов, Ю. Г. Квятковский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 58–64.

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)
8-(713)-270-37-82
E-mail: kuatov.baurjan@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)
8-(412)-56-43-46
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Рациональное построение моделирующей среды и программного обеспечения авиационного тренажера является актуальной проблемой. Обосновывается необходимость комплексного анализа про-

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'dinova
(463024, 16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, 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. Efficient simulation environment and aviation training device software is the actual problem. The necessity of a comprehensive analysis of the problem of structural synthesis of a complex tech-

блемы структурного синтеза сложной технической системы, построенной на основе модульного принципа конструирования.
Ключевые слова: авиационный тренажер, моделирующая среда, анализ модульной структуры, структурный синтез, моделирование, вычислительная система, теория графов.

nical system built on the basis of a modular design principle.

Key words: aviation simulator, simulation environment, analysis of modular structure, structural synthesis, modeling, computational system, graph theory.

УДК 623.746
Кемалов, Б. К.
К проблеме структурного синтеза моделирующей среды авиационного тренажера / Б. К. Кемалов, Б. Ж. Куатов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 9–16.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 623.4

ОПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОСФЕР

О. А. Голованов, В. Я. Савицкий, О. В. Филиппов

Введение

В настоящее время за рубежом интенсивно ведется разработка тактического лазерного оружия (ТЛО) для вывода из строя оптических и оптико-электронных приборов различного функционального назначения, а также для поражения органов зрения операторов и наводчиков боевых машин. Наиболее вероятное поражение органов зрения лазерным излучением возможно на длинах волн $\lambda = 1{,}06$ мкм ($f = 283$ ТГц) и $\lambda = 0{,}53$ мкм ($f = 566$ ТГц). Одно из направлений защиты от ТЛО – использование оптических фильтров частотно-заградительного типа, которые не пропускают (отражают) электромагнитную энергию в узкой полосе указанных частот. Перспективным направлением решения этой задачи является использование в оптических фильтрах фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния [1].

Технология изготовления фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния в настоящее время достаточно отработана [1]. Полосы непропускания электромагнитной энергии фотонными кристаллами зависят от периода решетки опаловой матрицы и от размера диэлектрических наносфер, а глубина запрещенной зоны – от толщины фотонного кристалла и совершенства его структуры [2]. Для того, чтобы изготовить оптический фильтр с требуемыми свойствами, необходимо провести математическое моделирование прохождения лазерного излучения через фотонный кристалл на электродинамическом уровне строгости.

1. Построение математической модели

Рассмотрим дифракцию плоской однородной электромагнитной волны с амплитудой c_1^+ и частотой f на фотонном кристалле в виде плоского диска радиуса D и толщиной d при угле падения излучения 90º (рис. 1). В результате дифракции электромагнитной волны на фотонном кристалле появляются отраженная волна с амплитудой c_1^- и прошедшая волна с амплитудой c_2^-. Прохождение электромагнитной волны через фотонный кристалл на различных частотах характеризуется коэффициентом прохождения

$$k_{\text{пр}} = \frac{\left|c_2^-\right|}{\left|c_1^+\right|}. \qquad (1)$$

Коэффициент прохождения принимает значения от $k_{\text{пр}} = 0$ (полное отражение от фотонного кристалла – запрещенная фотонная зона) до $k_{\text{пр}} = 1$ (полное прохождение через фотонный кристалл – зона пропускания).

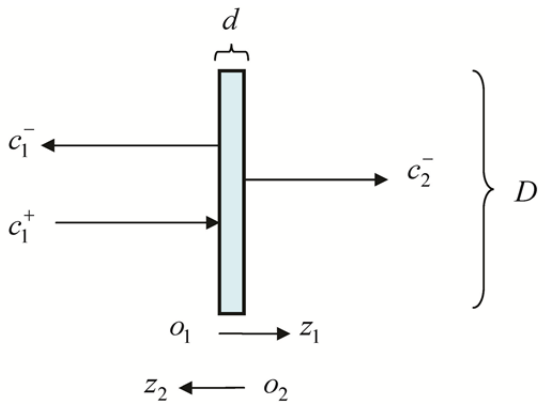


Рис. 1. Дифракция электромагнитной волны на фотонном кристалле: c_1^+ – амплитуда падающей волны, c_1^- – амплитуда отраженной волны, c_2^- – амплитуда прошедшей волны; $o_1\ z_1$, $o_2\ z_2$ – локальные системы координат

Математическую модель фотонного кристалла на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния будем строить с помощью декомпозиционного подхода [3]. Область фотонного кристалла на основе опаловой матрицы расчленяем условными границами на подобласти – автономные блоки в виде однотипных прямоугольных параллелепипедов (рис. 2) с диэлектрическими наносферами и каналами Флоке на гранях [4].

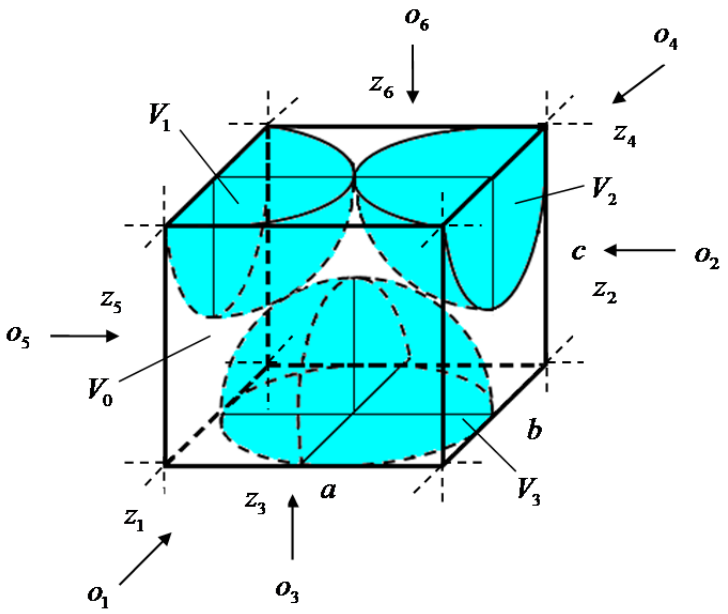


Рис. 2. Автономный блок в виде прямоугольного параллелепипеда с виртуальными каналами Флоке на гранях: V_0 – основная область; $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3$ – области диэлектрических наносфер; $V_0 - V$ – межсферическое пространство ; $o_\alpha z_\alpha$ $(\alpha = 1, 2, ..., 6)$ – локальные системы координат для входных сечений S_α (граней); a, b, c – геометрические размеры параллелепипеда

Дескриптор (в линейном приближении – это матрица рассеяния **R** [5]) автономного блока с каналами Флоке определяем в результате решения краевой задачи дифракции для уравнений

Максвелла с электродинамическими граничными условиями. Краевая задача электродинамики для автономного блока (см. рис. 2), содержащего диэлектрические наносферы, и каналами Флоке на гранях формулируется следующим образом.

Электромагнитное поле в области V (диэлектрические наносферы) автономного блока должно удовлетворять уравнениям Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\vec{H} = i\omega\ \varepsilon_0\varepsilon_\nu\vec{E}, \\ \operatorname{rot}\vec{E} = -i\omega\ \mu_0\mu_\nu\vec{H}, \end{cases} \tag{1}$$

где ε_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; ε_ν, μ_ν – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости наносфер.

На гранях автономного блока (входные сечения S_α) электромагнитное поле удовлетворяет условиям неасимптотического излучения [6]:

$$a_{k(\alpha)} + b_{k(\alpha)} = \int_{S_\alpha} (\vec{E}_\alpha \times \vec{h}^*_{k(\alpha)}) \cdot d\vec{S}_\alpha + \int_{S_\alpha} (\vec{e}_{k(\alpha)} \times \vec{H}^*_\alpha) \cdot d\vec{S}_\alpha, \quad k = 1,2,..., \ \alpha = 1,2,...,6, \tag{3}$$

где $\vec{e}_{k(\alpha)}, \vec{h}_{k(\alpha)}$ – электрическая и магнитная составляющие компонентов собственных волн каналов Флоке; k – номер моды собственной волны; α – номер грани параллелепипеда; $a_{k(\alpha)}, b_{k(\alpha)}$ – коэффициенты рядов Фурье

$$\vec{E}_\alpha = \sum_{k=1}^{\infty} a_{k(\alpha)}\vec{e}_{k(\alpha)}, \ \vec{H}_\alpha = \sum_{k=1}^{\infty} b_{k(\alpha)}\vec{h}_{k(\alpha)} \tag{4}$$

представления электрического и магнитного полей на гранях параллелепипеда. Для решения этой краевой задачи применим проекционный метод [6]. В качестве базисных функций $\{\vec{E}_k\}$, $\{\vec{H}_k\}$ используем системы собственных функций прямоугольного резонатора с однородно-периодическими граничными условиями на гранях резонатора. Собственные частоты ω_k и собственные функции $\{\vec{E}_k\}$, $\{\vec{H}_k\}$ резонатора определяются из решения следующей краевой задачи для уравнений Максвелла:

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{rot}\vec{H}_k &= i\omega_k\,\varepsilon_0\varepsilon_\nu\,\vec{E}_k; \\ \operatorname{rot}\vec{E}_k &= -i\omega_k\,\mu_0\mu_\nu\,\vec{H}_k, \end{aligned}\right\} \text{ в области } V_0, \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned} &\vec{E}_k(S_1) = \vec{E}_k(S_4), \ \ \vec{H}_k(S_1) = \vec{H}_k(S_4); \\ &\vec{E}_k(S_2) = \vec{E}_k(S_5), \ \ \vec{H}_k(S_2) = \vec{H}_k(S_5); \\ &\vec{E}_k(S_3) = \vec{E}_k(S_6), \ \ \vec{H}_k(S_2) = \vec{H}_k(S_6). \end{aligned}\right\} \text{ на гранях,}$$

где ε_ν, μ_ν – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды диэлектрических наносфер. Геометрические размеры прямоугольного резонатора (область V_0) совпадают с геометрическими размерами автономного блока (см. рис. 2). Применяя метод Галеркина, из проекционной формы и условий неасимптотического излучения (3) получаем матрицу рассеяния автономного блока **R**.

Задачу дифракции на фотонном кристалле решаем с помощью декомпозиционного вычислительного алгоритма на основе метода автономных блоков с каналами Флоке [4], модифицированного с целью учета диэлектрических наносфер. В декомпозиционной схеме моделирования фотонного кристалла все автономные блоки являются однотипными, что позволяет использовать

вычислительный алгоритм многоуровневой рекомпозиции блоков (рис. 3), который существенно сокращает время расчетов на компьютере.

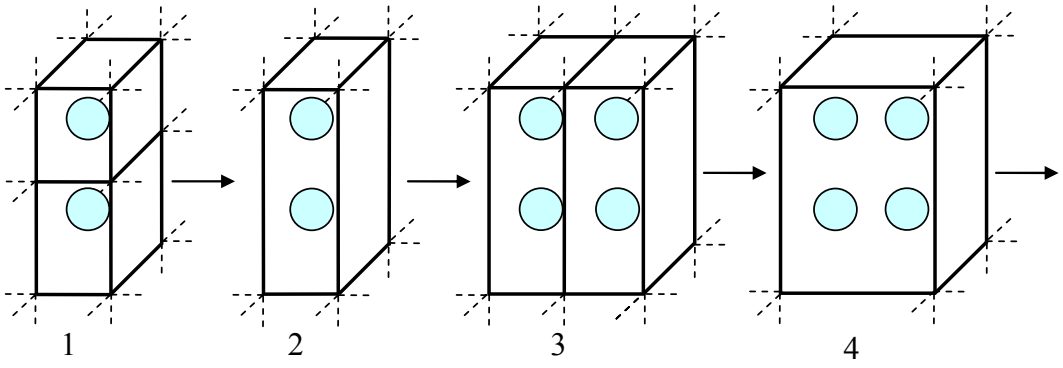


Рис. 3. Многоуровневая рекомпозиция автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами: 1–4 – фрагменты рекомпозиции

Многоуровневая рекомпозиция автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами заключается в следующем. Два однотипных автономных блока объединяются в один блок в виде прямоугольного параллелепипеда (фрагмент 1). Два виртуальных канала Флоке на гранях этого автономного блока преобразуются в один виртуальный канал. В результате преобразования получаем автономный блок с шестью виртуальными каналами на гранях (фрагмент 2), затем процесс повторяется (фрагменты 3, 4 на рис. 3.).

2. Теоретическое исследование оптических фильтров

Результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения оптического излучения через фотонный кристалл в зависимости от радиуса наносфер r при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$ (различного числа слоев N) показаны на рис. 4. Как следует из результатов математического моделирования, положение запрещенной фотонной зоны зависит от радиуса наносфер r (периода решетки опаловой матрицы), и непрохождение лазерного излучения через фотонный кристалл вблизи частоты $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1{,}06$ мкм) наблюдается при радиусах наносфер от 128 до 142 нм. Чем больше толщина фотонного кристалла (число слоев N), тем меньше коэффициент прохождения, а следовательно, и лучше защита от лазерного излучения. При этом разброс размеров наносфер (радиусов r) не должен превышать 5 %.

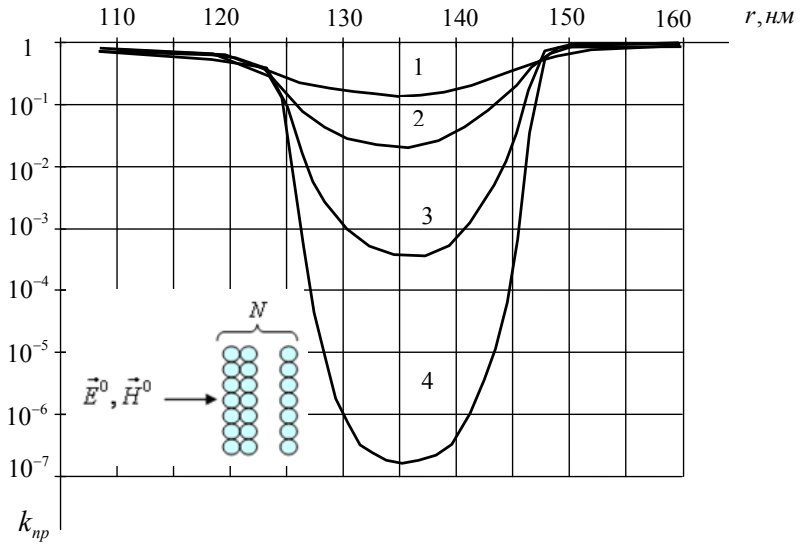


Рис. 4. Коэффициент прохождения оптического излучения через 3-D фотонно-кристаллическую структуру в зависимости от радиуса наносфер r при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$: $f = 283$ ТГц

($\lambda = 1{,}06$ мк); наносфера SiO_2 ($\varepsilon_1 = 4{,}6 - i5 \cdot 10^{-4}$, $\mu_1 = 1$); межсферическое заполнение ($\varepsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$); $D = 10$ мм; кривая 1 – $N = 8$, 2 – $N = 16$, 3 – $N = 32$, 4 – $N = 64$

Рассчитанные зависимости коэффициента прохождения оптического излучения через фотонный кристалл от частоты при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$ (различном числе слоев N) показаны на рис. 5,*а–г*.

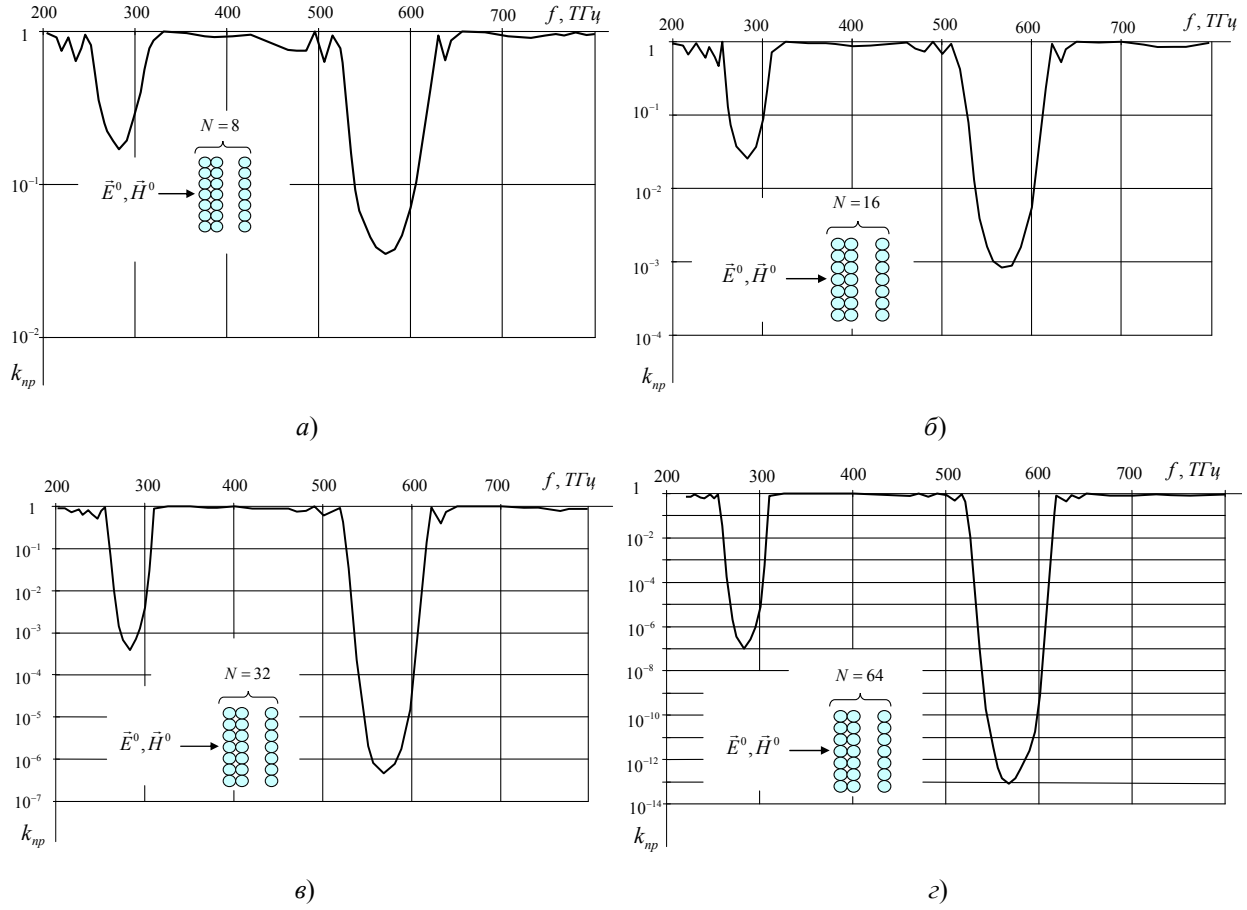


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента прохождения оптического излучения через фотонный кристалл при различной толщине $d = 2rN$ фотонного кристалла:
а – $N = 8$; *б* – $N = 16$; *в* – $N = 32$; *г* – $N = 64$; наносфера SiO_2 ($\varepsilon_1 = 4{,}6 - i5 \cdot 10^{-4}$, $\mu_1 = 1$), $r = 135$ нм; межсферическое заполнение ($\varepsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$); $D = 10$ мм

Как следует из результатов математического расчета, приведенных на рис. 5,*а–г*, оптический фильтр на основе фотонного кристалла имеет запрещенные фотонные зоны (полосы непропускания для лазерного излучения) на частотах $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1{,}06$ мкм) и $f = 566$ ТГц ($\lambda = 0{,}53$ мкм), в остальной части частотного спектра практически пропускает электромагнитные волны.

Заключение

Степень защиты от лазерного излучения с помощью оптического фильтра существенно зависит от толщины фотонного кристалла – чем больше толщина, тем надежнее защита. Однако необходимо отметить, что изготовление фотонных кристаллов толщиной $d = 2rN$ с числом слоев $N = 64$ и выше сопряжено со значительными технологическими трудностями. Время изготовления таких кристаллов – несколько недель, при этом структура решеток может иметь значительные дефекты. Оптический фильтр на основе опаловой матрицы с гексагональной решеткой из наносфер SiO_2 диаметром 270 мкм (разброс по диаметру не более 5 %) с толщиной $N = 32$ надежно

защищает зрение операторов оптических приборов от тактического лазерного оружия частот $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1{,}06$ мкм) и $f = 566$ ТГц ($\lambda = 0{,}53$ мкм). Поток световой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению, от объекта наблюдения снижается в два раз, при этом наблюдатель практически не видит зеленый цвет и частично желтый.

Список литературы

1. Исследование опаловых матриц и нанокомпозитов на их основе / М. И. Самойлович, А. Ф. Белянин, С. М. Клещева, В. Д. Житковский, А. В. Гурьянов // Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники) : моногр. – М. : ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2004. – Ч. 3. – С. 257−363.
2. Горелик, В. С. Оптические и диэлектрические свойства наноструктурированных фотонных кристаллов, заполненных сегнетоэлектриками и металлами / В. С. Горелик // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып. 7. – С. 1252–1258.
3. Горячев, Н. В. Индикатор обрыва предохранителя как элемент первичной диагностики отказов РЭА / Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2010. – Т. 2. – С. 78–79.
4. Никольский, В. В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1983. – 297 с.
5. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
6. Голованов О. А. Автономные блоки с виртуальными каналами Флоке и их применение для решения прикладных задач электродинамики / О. А. Голованов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 12. – С. 1423–1430.
7. Рындин, Д. А. Применение индикаторных проникающих веществ для повышения эффективности работы автоматических систем оптического контроля печатных плат / Д. А. Рындин, А. В. Лысенко, Е. А. Сидорова // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 2. – С. 84–86.
8. Голованов, О. А. Построение дескрипторов нелинейных универсальных автономных блоков с каналами Флоке итерационным методом на основе проекционной модели / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. А. Туманов // Известия вузов. Поволжский регион. Серия «Естественные науки». – 2006. – № 5 (26). – С. 157–166.
9. Никольский, В. В. Проекционные методы в электродинамике / В. В. Никольский // Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. – М. : Высшая школа, 1977. – С. 4–23.

Голованов Олег Александрович
доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра общеобразовательных дисциплин,
Пензенский артиллерийский инженерный институт
(440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5)
E-mail: golovanovol@mail.ru

Savitskiy Vladimir Yakovlevich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department № 11,
Penza artillery engineering institute
(440005, Penza-5, Penza region, Russia)

Savitskiy Vladimir Yakovlevich
доктор технических наук, профессор,
кафедра № 11,
Пензенский артиллерийский инженерный институт
(440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5)
E-mail: W.savis@gmail.com.

Filippov Oleg Valer'evich
postgraduate student,
sub-department of general subjects,
Penza artillery engineering institute
(440005, Penza-5, Penza region, Russia)

Филиппов Олег Валерьевич
аспирант,
кафедра общеобразовательных дисциплин,
Пензенский артиллерийский инженерный институт
(440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5)
E-mail: Filippov_ov@mail.ru

Аннотация. Предложена математическая модель оптического фильтра на основе опаловой матрицы из кубических упаковок диэлектрических наносфер двуокиси кремния. Математическая модель постро-

Abstract. The mathematical model of the optical filter on the basis of an opal matrix from cubic packings dielectric nanosphere is offered to dioxide of silicon. The mathematical model is constructed by means of inde-

ена с помощью автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами и виртуальными каналами Флоке. Получены результаты расчета коэффициента прохождения электромагнитного излучения через оптический фильтр от частоты при различной толщине фотонного кристалла. Установлены рациональные параметры опаловой матрицы для изготовления оптического фильтра.

Ключевые слова: тактическое лазерное оружие, защитный фильтр, опаловая матрица, математическая модель, автономный блок, матрица рассеяния, спектральные характеристики.

pendent blocks as rectangular parallelepipeds with dielectric nanospheres and virtual channels the Flock. Results of calculation of factor of passage of electromagnetic radiation through the optical filter from frequency are received at various thickness of a photon crystal. Rational parameters of an opal matrix for manufacturing the optical filter are established.

Key words: the tactical laser weapon, the protective filter, an opal matrix, mathematical model, the independent block, a matrix of dispersion, spectral characteristics.

УДК 623.4

Голованов, О. А.

Оптические фильтры на основе опаловых матриц из диэлектрических наносфер / О. А. Голованов, В. Я. Савицкий, О. В. Филиппов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 17–23.

УДК 621.3.087.92

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ КВАНТОВАНИЯ ΣΔ-АЦП

В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев

На сегодняшний день ΣΔ-АЦП благодаря своим уникальным метрологическим и техническим характеристикам прочно вошли в состав многих систем измерения. Высокое разрешение и наличие встроенного предварительного усилителя с программируемым коэффициентом усиления позволяют применять серийные ΣΔ-АЦП для непосредственной оцифровки сигналов малого уровня, которые поступают с датчиковой аппаратуры. В частности, сегодня измерительные ΣΔ-АЦП практически незаменимы в задачах преобразования тензометрических сигналов, биометрических сигналов, сигналов термопар и др., т.е. там, где требуется обеспечение динамического диапазона на уровне 120 дБ и разрешения до единиц микровольт [1, 9].

Известно, что у ΣΔ-АЦП имеется возможность выполнять «обмен» разрешения по напряжению на разрешение по времени или, другими словами, производить оптимизацию преобразователя по критерию «точность-быстродействие» для конкретной практической задачи. При этом сам ΣΔ-АЦП остается в режиме непрерывного функционирования, а изменяется лишь интервал снятия цифровых отсчетов [3].

Следует отметить, что согласно паспортным данным эффективная разрядность, равная 24 двоичным разрядам, достигается только на частотах преобразования порядка 10 Гц. В табл. 1 приведены примеры, показывающие варианты обмена разрешения по напряжению на разрешение по времени для некоторых микросхем ΣΔ-АЦП производства Analog Devices и Texas Instruments [4–6].

Таблица 1

Примеры характеристик микросхем ΣΔ-АЦП

Микросхема ΣΔ-АЦП	Характеристики	
AD7791 (2003 г.)	Эффективная разрешающая способность:	
	22 бита	при частоте 9,5 Гц
	20 бит	при частоте 33,3 Гц
	18 бит	при частоте 120 Гц
ADS1274 (2007 г.)	Отношение сигнал/шум:	
	111 дБ	при частоте 52 кГц
	106 дБ	при частоте 144 кГц
AD7765 (2009 г.)	Динамический диапазон:	
	115 дБ	при частоте 78 кГц
	112 дБ	при частоте 156 кГц
AD7195 (2010 г.)	Эффективная разрешающая способность:	
	22 бита	при частоте 4,7 Гц
	14 бит	при частоте 4,8 кГц
ADS131e08 (2013 г.)	Эффективная разрешающая способность:	
	20 бит	при частоте 1 кГц
	18 бит	при частоте 8 кГц
	16 бит	при частоте 32 кГц

Из приведенных данных видно, что за получение эффективной разрешающей способности в 20 и более бит необходимо «платить» существенными временами преобразования. Такая ситуация обусловлена используемыми подходами к анализу работы ΣΔ-преобразователей. Во всех из-

вестных авторам публикациях утверждается, что «ΣΔ-модулятор очень сложно анализировать во временном интервале из-за явно случайного характера одноразрядных выходных данных» [1, с. 289]. Поэтому применяется анализ в частотной области, а расчет характеристик и путей их достижения проводится на основе концепций передискретизации, шейпинга шума квантования, цифровой фильтрации шума квантования и децимации. Данные концепции хорошо известны и подробно описаны в литературе [1, 2, 7, 8], поэтому ввиду ограниченности работы поясняться не будут.

Однако «обмен» разрешающей способности на время преобразования разворачивается во временной области и непосредственно связан с механизмом формирования результата [10, 11]. Поэтому с целью определения возможных путей повышения характеристик ΣΔ-преобразователей по критерию «точность-быстродействие» решено провести соответствующий анализ во временной области на базовом алгоритме ΣΔ-АЦП первого порядка.

В ΣΔ-АЦП преобразование происходит в две стадии: на первой входное аналоговое напряжение преобразуется в бинарный поток данных; на второй – выборка бинарных данных посредством цифровой фильтрации преобразуется в итоговый цифровой отсчет. Первая операция выполняется ΣΔ-модулятором путем формирования на выходе интегратора развертывающей функции $R(t)$ поочередным интегрированием суммы или разности входного U_x и опорного U_0 напряжений в тактах синхронизации фиксированной длительности T_0. Модулятор первого порядка (порядок определяется количеством интеграторов) состоит из одного интегратора, одноразрядного квантователя (компаратора, синхронизированного частотой f_0) и одного одноразрядного ЦАП (рис. 1). Смена знака опорного напряжения выполняется в начале каждого такта синхронизации T_0, если на предыдущем такте $R(t)$ изменила свой знак на противоположенный. Таким образом, на интервале преобразования $T_п = MT_0$ (где M – целое число) формируется один цифровой отсчет, соответствующий среднему значению входного напряжения на этом интервале. Данная стадия преобразования выполняется цифровым фильтром (ЦФ) с функцией прореживания (децимации). В простейшем случае данный ЦФ выполняет простую операцию усреднения.

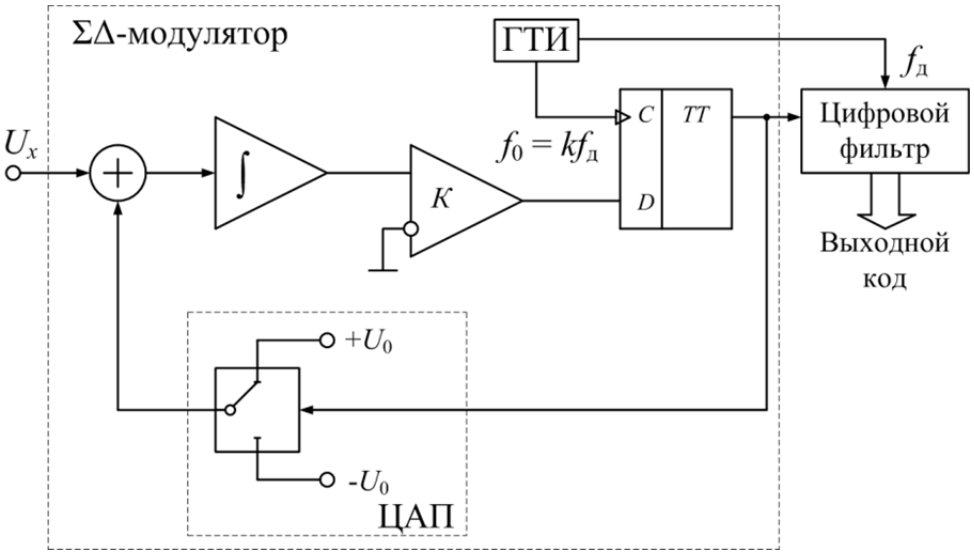


Рис. 1. Структура ΣΔ-АЦП первого порядка

Согласно приведенному описанию в ΣΔ-АЦП осуществляется уравновешивание значения $\int_0^{T_п} U_x dt$ последовательностью значений $\sum_{i=1}^{n}\int_0^{T_0} U_0^{+} dt$ и $\sum_{j=1}^{m}\int_0^{T_0} U_0^{-} dt$, где U_x – входное преобразуемое напряжение, $U_0{}^{+}$ и U_0^{-} – значения положительного и отрицательного опорных напряжений, n и m – целые числа, T_0 – длительность такта синхронизации, $T_п = (n + m)T_0$ – интервал преобразования. Так как U_x может принимать бесконечное число значений, а все остальные величины конечны, то процесс полного завершения преобразования именно за время $T_п$ может произойти только в ко-

нечном числе случаев. В остальных случаях имеет место методическая погрешность ΔR. Соответствующая этому математическая модель имеет следующий вид:

$$\int_0^{T_п} U_x dt - \left[\sum_{i=1}^{n} \int_0^{T_0} U_0^+ dt + \sum_{j=1}^{m} \int_0^{T_0} U_0^- dt \right] = \begin{cases} 0 \\ \Delta R \end{cases}. \quad (1)$$

Временные диаграммы, описывающие работу ΣΔ-АЦП первого порядка, представлены на рис. 2. Кроме развертывающей функции $R(t)$ (верхний график) и соответствующих ей бинарных данных на выходе ΣΔ-модулятора (нижний график), процесс формирования $R(t)$ для большей наглядности показан в виде вольт-секундных площадей $S_{R+} = \int_0^{T_0} (U_x + U_0) dt$ и $S_{R-} = \int_0^{T_0} (U_x - U_0) dt$

.

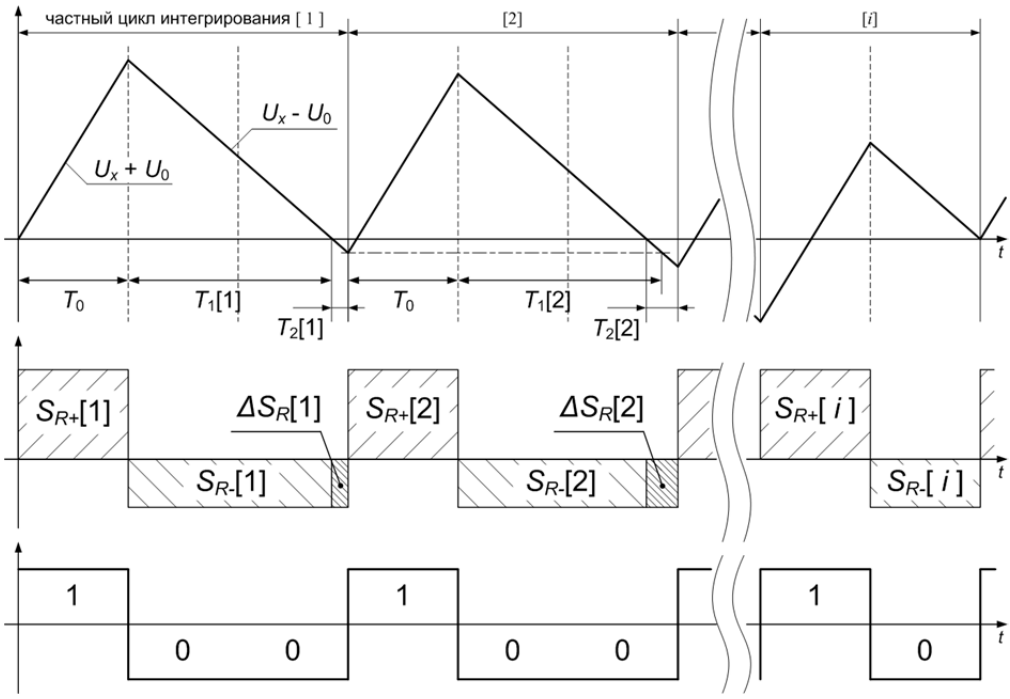


Рис. 2. Временные диаграммы, показывающие процесс формирования развертывающей функции в ΣΔ-АЦП

Чтобы пояснить детерминированность погрешности квантования, проанализируем процесс формирования развертывающей функции в ΣΔ-АЦП, разбивая ее на частные циклы интегрирования (рис. 2). Будем считать, что входное напряжение постоянно $U_x = \text{const}$ на всем интервале преобразования. В первом частном цикле интегрирования имеют место нулевые начальные условия. Запишем соответствующее ему выражение для развертывающей функции:

$$R[1] = T_0(U_x + U_0) + T_1[1](U_x - U_0) + T_2[1](U_x - U_0). \quad (2)$$

Первое и второе слагаемые правой части выражения (2) представляют собой идеальный результат преобразования, а третье слагаемое – погрешность преобразования за первый частный цикл интегрирования. Выразим погрешность формирования развертывающей функции:

$$T_2[1](U_x - U_0) = T_0(U_x + U_0) + 2T_0(U_x - U_0). \quad (3)$$

Для второго частного цикла с учетом ненулевых начальных условий получаем

$$R[2] = T_0(U_x + U_0) + T_1[2](U_x - U_0) + T_2[2](U_x - U_0) - T_2[1](U_x - U_0).$$

Учитывая, что $T_1[1] = T_1[2] = T_1[i]$ и $T_2[2] = 2T_2[1]$, так как $U_x = \text{const}$, получаем

$$T_2[2](U_x - U_0) = 2T_0(U_x + U_0) + 4T_0(U_x - U_0).$$

Отсюда запишем выражение для НРФ за два частных цикла интегрирования:

$$R[1+2] = 2T_0(U_x + U_0) + 2T_1[1](U_x - U_0) + 2T_2[1](U_x - U_0).$$

Аналогично для трех частных циклов:

$$R[1+2+3] = 3T_0(U_x + U_0) + 3T_1[1](U_x - U_0) + 3T_2[1](U_x - U_0).$$

Пусть $T_2[1] = kT_0$, где $0 \le k < 1$, тогда

$$T_1[1] = mT_0 - kT_0 = (m-k)T_0.$$

На этой основе запишем общее выражение для развертывающей функции за n частных циклов интегрирования:

$$R[n] = \sum_{i=1}^{n}\left[T_0(U_x + U_0) + (m-k)T_0(U_x - U_0)\right] + \sum_{i=1}^{n}\left[kT_0(U_x - U_0)\right]. \quad (4)$$

Для большей наглядности произведем следующие замены: $U_\Sigma = (U_x + U_0)$ и $U_\Delta = (U_x - U_0)$. Согласно выражению (1) в случае нулевых начальных условий для нахождения результата преобразования необходимо обеспечить $R[n] = 0$, тогда

$$\sum_{i=1}^{n}\left[U_\Sigma + (m-k)U_\Delta\right] + \sum_{i=1}^{n}\left[kU_\Delta\right] = 0. \quad (5)$$

Выражение (5) дает представление о природе методической погрешности квантования ΣΔ-АЦП. В нем левая сумма представляет собой результат преобразования без погрешности, а правая – саму погрешность. Переменные n и m – целые числа, а k – дробное. Таким образом, решение может быть получено в целых числах только в моменты формирования развертывающей функции, когда $nk = l$, где l – целое число.

Обеспечения выполнения равенства в выражении (5) (с учетом требования: n и m – целые числа) можно добиться, сделав величину U_0 переменной. В этом случае необходимо иметь ряд U_0 для диапазона средних значений входного U_x. Данный подход реализует аппарат скремблирования в современных устройствах ΣΔ-АЦП. Очевидно, что для повышения числа решений необходимо увеличивать количество U_0, что приводит к пропорциональному увеличению сложности скремблирующего устройства и надежности его работы в условиях помех.

Для проведения дальнейшего анализа работы ΣΔ-АЦП во временной области и определения эффективности принимаемых решений, направленных на минимизацию погрешности квантования, было получено следующее выражение:

$$U_x = \frac{m-n}{m+n}U_0, \quad (7)$$

где $U_0 = |\pm U_0|$, n – количество тактов преобразования соответствующих подключению положительного опорного напряжения, а m – отрицательного. Данное выражение получено детализацией (1) с учетом (5) и описывает процесс формирования результата во временной области.

На рис. 3 представлены графики формирования результата преобразования во времени, полученные с помощью выражения (7). Видно, что процесс имеет строго фиксированную структуру, определяемую средним значением входного напряжения.

Таким образом, проведенный анализ работы алгоритма ΣΔ-преобразования во временной области показал, что значения погрешности квантования на каждом конкретном интервале формирования развертывающей функции, на котором вычисляется результат преобразования, являются случайной величиной из допустимого диапазона. Однако сам процесс формирования погрешности квантования строго детерминирован, а значения погрешности квантования в каждом

текущем такте работы T_0 являются не случайными, а строго определенными и напрямую зависят от условий работы преобразователя.

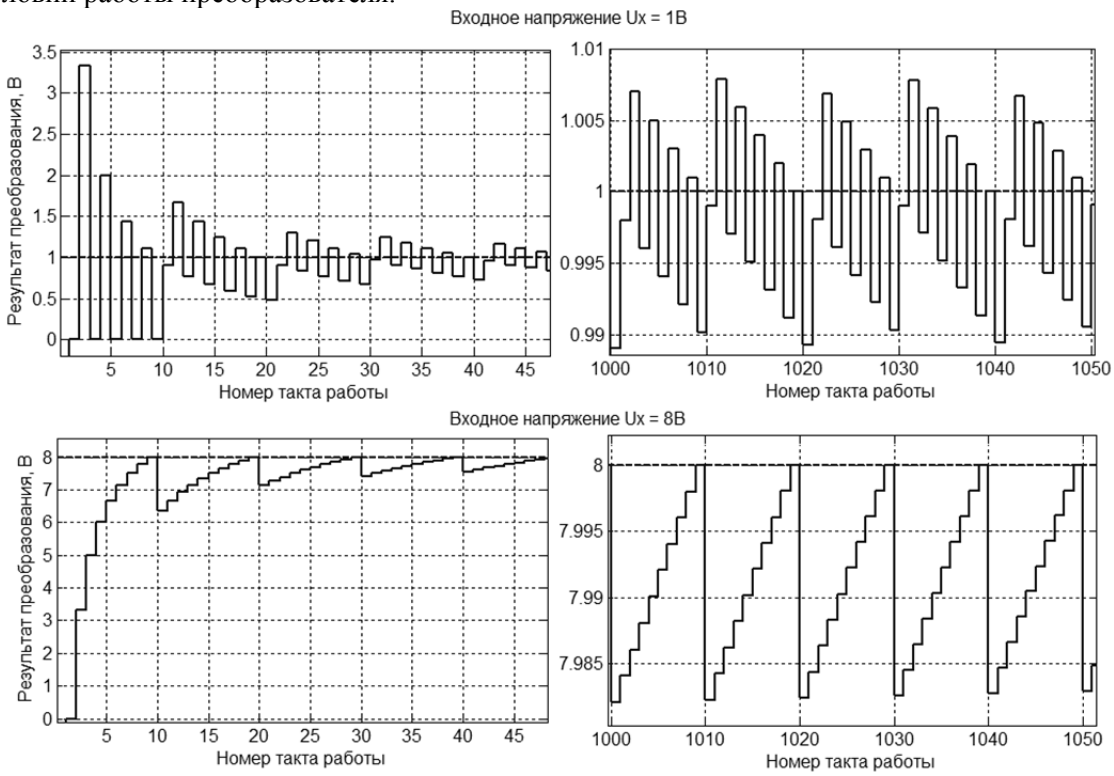


Рис. 3. Графики формирования результата преобразования во времени для входных напряжений U_x = 1 В и U_x = 8 В (U_0 = 10 В)

Список литературы

1. Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер ; пер. с англ. ; под ред. Е. Б. Володина. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.
2. Шахов, Э. К. ΣΔ-АЦП: Процессы передискретизации, шейпинга шума квантования и децимации / Э. К. Шахов // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 50–57.
3. Юрманов, В. А. Реализации передискретизации в ΣΔ-АЦП на непрерывных интеграторах / В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев, А. В. Куц // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 1 (25). – С. 113–121.
4. Официальный сайт фирмы Analog Devices. – URL: http://www.analog.com, свободный (дата обращения: 14.01.2015).
5. Официальный сайт фирмы Texas Instruments. – URL: http://www.ti.com, свободный (дата обращения: 16.01.2015).
6. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
7. Шахов, Э. К. ΣΔ-АЦП: Классификация и математические модели / Э. К. Шахов // Датчики и системы. – 2006. – № 12. – С. 69–77.
8. Баннов, В. Я. Автоматизированный стенд исследования процедуры формирования тестового воздействия при проведении диагностики логических схем электронных устройств / В. Я. Баннов, Е. В. Сапрова, А. В. Затылкин // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2011. – Т. 2. – С. 32–34.
9. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
10. Yurkov, N. K. A comparative analysis of the accuracy and dynamic characteristics of two systems for converting the parameters of passive electrical quantities into on active quantity / N. K. Yurkov, E. N. Kuznetsov, N. E. Kuznetsov // Measurement Techniques. – 2007. – V. 50, № 2. – February. – P. 184–189.

11. Analysis of the errors of active converters of passive electrical quantities / N. K. Yurkov, E. N. Kuznetsov, N. E. Kuznetsov, B. V. Tsypin // Measurement Techniques. – 2006. – V. 49, № 7. – July. – P. 703–705.

Юрманов Валерий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
(841-2)49-60-09
E-mail: YurmanovVA@gmail.com

Yurmanov Valeriy Anatol'evich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technologies and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11, Baydukova travel / Gagarina street,
Penza, Russia)

Пискаев Кирилл Юрьевич
старший преподаватель,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
(841-2)49-60-09
E-mail: PiskaevK@gmail.com

Piskaev Kirill Yur'evich
senior lecturer,
sub-department of information technologies and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11, Baydukova travel / Gagarina street,
Penza, Russia)

Аннотация. Сегодня ΣΔ-АЦП считаются наиболее совершенными в классе интегрирующих аналого-цифровых преобразователей, что обусловлено их высокими метрологическими (достигнуто разрешение в 24 разряда) и техническими (простота реализации, надежность и т.д.) характеристиками. Однако по совокупному критерию «точность-быстродействие» современные ΣΔ-АЦП остаются непригодными для многих областей применения. В работе синтезирована дискретная модель, описывающая процесс преобразования во временной области. Модель объясняет механизм появления методической погрешности квантования и может использоваться при поиске алгоритмических и технических решений, направленных на ее минимизацию, в том числе в задачах оптимизации преобразователя по критерию «точность-быстродействие» для конкретной предметной области.

Ключевые слова: интегрирующие аналого-цифровые преобразователи; ΣΔ-АЦП; погрешность квантования ΣΔ-АЦП; анализ работы ΣΔ-АЦП во временной области.

Abstract. Today ΣΔ-ADCs are the most advanced in the class of integrating analog-to-digital converters. This situation are explained their high metrological (achieved resolution of 24 bits) and technical (ease of implementation, reliability, etc.) characteristics. However, the aggregate criterion of «precision-performance» modern ΣΔ-ADCs are unsuitable for many applications. In this paper was synthesized discrete model describing the process of conversion in the time domain. The model explains the process of the emergence of the quantization errors and can be used in the development of algorithms and technical solutions for its reduction. In addition the model can be used for solving ADC optimization problems.

Key words: integrating analog-to-digital converters; ΣΔ-ADC; quantization errors in ΣΔ-ADC; analysis of ΣΔ-ADCs in the time domain.

УДК 621.3.087.92
Юрманов, В. А.
Анализ погрешности квантования ΣΔ-АЦП / В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 24–29.

УДК 62-503.5

К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБОК СЕЛЕКЦИИ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Б. Ф. Безродный, С. А. Майоров

Возникает проблема обеспечения требуемой высокой надежности ответственной электронной аппаратуры, используемой на критически важных объектах, при проведении мероприятий по импортозамещению применяемых в ней электронных компонентов, включая различные микроэлектронные изделия. В силу меньшей стабильности технологического процесса изготовления их качество, надежность и, соответственно, значения параметров имеют больший, по сравнению с импортными аналогами, разброс. Поэтому на практике оказывается необходимым проведение предварительной селекции образцов этих компонентов (изделий) с целью выбора наиболее приемлемых для изготовления конкретного типа электронной аппаратуры, т.е. для проведения ее «селективной сборки». Такую процедуру предлагается проводить с помощью статистического распознавания, считая распределения из-за большого числа влияющих факторов нормальными [1].

В этом случае для проведения контроля состояния образцов электронного компонента следует использовать вектор из p параметров, принимаемых для простоты некоррелированными, а вследствие допущения нормального распределения и независимыми. При этом решающее правило будет иметь вид [1]:

$$\sum_{j=1}^{p}\left\{\frac{1}{\hat{\sigma}_{0j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-\hat{a}_{0j}\right)^2-\frac{1}{\hat{\sigma}_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-\hat{a}_{1j}\right)^2+n\ln\frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2}\right\}\geq 0\,. \qquad (1)$$

При выполнении неравенства контрольная выборка из n замеров вектора контролируемых параметров признается соответствующей классу S_1, т.е. удовлетворяющих требованиям конкретного типа электронной аппаратуры, а при выполнении обратного неравенства – классу S_0 (неудовлетворяющих). В (1) $\hat{\bar{a}}_i=\left(\hat{a}_{i1},...,\hat{a}_{ip}\right)$ и $\hat{M}_i=diag\left(\hat{\sigma}_{i1}^2,...,\hat{\sigma}_{ip}^2\right)$ – оценки векторов средних и ковариационных матриц распределений значений контролируемых параметров в различаемых классах образцов исследуемого электронного компонента, а $\bar{x}_i=\left(x_{i1},...,x_{ip}\right)$ – элементы контрольной выборки замеров вектора контролируемых параметров. При n = 1 контролю подвергается каждый отдельный образец, в противном случае – однородная партия образцов, имеющих практически идентичные качество и надежность.

При больших объемах обучающих выборок m_0 и m_1, что достигается при производстве электронных компонентов достаточно большими сериями, позволяющем составить установочные партии более чем из ста образцов, вышеупомянутые оценки векторов средних и ковариационных матриц сходятся по вероятности к соответствующим неизвестным значениям векторов средних и ковариационных матриц [1], что позволяет считать их известными и использовать при вычислениях вместо них близкие к этим истинным значениям оценки. При этом неравенство (1) трансформируется в неравенство

$$\sum_{j=1}^{p}\left\{\frac{1}{\sigma_{0j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-a_{0j}\right)^2-\frac{1}{\sigma_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-a_{1j}\right)^2+n\ln\frac{\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2}\right\}\geq 0\,. \qquad (2)$$

После преобразования каждого слагаемого внешней суммы по j в (1), неравенство (2) сводится к

$$\sum_{j=1}^{p}\frac{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}{\sigma_{0j}^2\sigma_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-\frac{a_{0j}\sigma_{1j}^2-a_{1j}\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}\right)^2\geq n\sum_{j=1}^{p}\left[\frac{\left(a_{0j}-a_{1j}\right)^2}{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}-\ln\frac{\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2}\right]. \qquad (3)$$

Для определения вероятности ошибки контроля первого рода α следует предположить, что элементы контрольной выборки $\overline{x}_1,\ldots,\overline{x}_n$ принадлежат к классу S_0, т.е. подчиняются p-мерному нормальному закону с вектором средних $\overline{a}_0$ и ковариационной матрицей $M_0 = diag\left(\sigma_{01}^2,\ldots,\sigma_{0p}^2\right)$. Каждую из независимых величин x_{ij} можно представить в виде $x_{ij} = \xi_{ij}\sigma_{0j} + a_{0j}$, где случайные величины ξ_{ij}, $i = 1, \ldots, n$; $j = 1, \ldots, p$ – независимы между собой и подчиняются одномерному нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией. Для осуществления необходимого преобразования неравенства (3) в него подставим выражения случайных величин x_{ij} через ξ_{ij}, после чего оно примет вид

$$\sum_{j=1}^{p}\frac{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}{\sigma_{0j}^2\sigma_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(\xi_{ij}\sigma_{0j}+\frac{\sigma_{0j}^2\left(a_{1j}-a_{0j}\right)}{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}\right)^2 \geq n\sum_{j=2}^{p}\left[\frac{\left(a_{0j}-a_{1j}\right)^2}{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}-\ln\frac{\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2}\right]. \tag{4}$$

Если ввести в рассмотрение величины $d_j = \left(a_{1j}-a_{0j}\right)^2/\sigma_{0j}^2$ и $r_j = \sigma_{1j}^2/\sigma_{0j}^2$; j=1,...,p, неравенство (4) преобразуется в

$$\sum_{j=1}^{p}\frac{r_j-1}{r_j}\sum_{i=1}^{n}\left(\xi_{ij}+\frac{\sqrt{d_j}}{r_j-1}\right)^2 \geq n\sum_{j=1}^{p}\left[\frac{d_j}{r_j-1}+\ln r_j\right]. \tag{5}$$

Внутренняя сумма в левой части неравенства (5) представляет собой случайную величину, имеющую нецентральное χ^2-распределение с n степенями свободы и параметром нецентральности $nd_j/\left(r_j-1\right)^2$. Таким образом, левая часть неравенства (5) представляет собой линейную комбинацию случайных величин, имеющих нецентральное χ^2-распределение с n степенями свободы, что позволяет, воспользовавшись инверсной формулой Имхофа [2], получить формулы для вычисления вероятности ошибки контроля первого рода α

$$\alpha = \frac{1}{2}-\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{\sin\Theta(u)}{u\rho(u)}du\,, \tag{6}$$

где

$$\Theta(u) = \frac{1}{2}\left\{nu\sum_{j=1}^{p}\left[\frac{d_j}{r_j-1}+\ln r_j\right]-\sum_{j=1}^{p}\left[n\operatorname{arctg}\left(\frac{r_j-1}{r_j}u\right)+\frac{r_j n d_j u}{\left(r_j-1\right)\left(r_j^2+\left(r_j-1\right)^2u^2\right)}\right]\right\},$$

$$\rho(u) = \prod_{j=1}^{p}\left[1+\left(\frac{r_j-1}{r_j}\right)^2u^2\right]^{\frac{n}{4}}\cdot\exp\left\{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\frac{nd_ju^2}{r_j^2+\left(r_j-1\right)^2u^2}\right\}.$$

Для определения вероятности ошибки контроля второго рода β необходимо положить, что элементы контрольной выборки принадлежат классу S_1 и подчиняются p-мерному нормальному закону с вектором средних $\overline{a}_1$ и ковариационной матрицей $M_1 = diag\left(\sigma_{11}^2,\ldots,\sigma_{1p}^2\right)$ и выполняется неравенство, обратное (4):

$$\sum_{j=1}^{p}\frac{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}{\sigma_{0j}^2\sigma_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-\frac{a_{0j}\sigma_{1j}^2-a_{1j}\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}\right)^2 < n\sum_{j=1}^{p}\left[\frac{\left(a_{0j}-a_{1j}\right)^2}{\sigma_{1j}^2-\sigma_{0j}^2}-\ln\frac{\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2}\right]. \tag{7}$$

Независимые случайные величины x_{ij} в данном случае представимы в виде $x_{ij} = \eta_{ij}\sigma_{1j} + a_{1j}$, где случайные величины η_{ij} опять-таки подчиняются одномерному нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией. После подстановки в (4) выражения x_{ij} через η_{ij} с учетом ранее введенных величин d_j и r_j, $j = 1, \ldots, p$ неравенство (7) преобразуется к виду, аналогичному (5):

$$\sum_{j=1}^{p}\left(r_j - 1\right)\sum_{i=1}^{n}\left(\eta_{ij} + \frac{\sqrt{d_j r_j}}{r_j - 1}\right)^2 < n\sum_{j=1}^{p}\left[\frac{d_j}{r_j - 1} + \ln r_j\right]. \tag{8}$$

В данном случае внутренняя сумма в левой части неравенства (8) также является случайной величиной, имеющей нецентральное χ^2-распределение с n степенями свободы, но уже с параметром нецентральности $nd_j r_j / \left(r_j - 1\right)^2$. Далее также с помощью инверсной формулы Имхофа [2] получается формула для вероятности ошибки контроля второго рода

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{\sin\Theta(u)}{u\rho(u)}du, \tag{9}$$

где

$$\Theta(u) = \frac{1}{2}\left\{\sum_{j=1}^{p}\left[n\mathrm{arctg}\left[\left(r_j - 1\right)u\right] + \frac{nd_j r_j u}{\left(r_j - 1\right)\left[1 + \left(r_j - 1\right)^2 u^2\right]}\right] - nu\sum_{j=1}^{p}\left[\frac{d_j}{r_j - 1} + \ln r_j\right]\right\},$$

$$\rho(u) = \prod_{j=1}^{p}\left[1 + \left(r_j - 1\right)^2 u^2\right]^{\frac{n}{4}}\exp\left\{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\frac{nd_j r_j u^2}{1 + \left(r_j - 1\right)^2 u^2}\right\}.$$

При реальном производстве электронных компонентов случай больших обучающих выборок, т.е. установочных партий, содержащих от одной до нескольких сотен образцов, достаточно редок. Если же обучающие выборки – средние, т.е. состоят из нескольких десятков элементов, то в этом случае вероятности ошибок контроля первого и второго рода, рассчитанные по формулам (6) и (9), будут существенно отличаться от реальных [1]. Согласно [1] в первую очередь следует при средних объемах обучающих выборок учесть априорную неопределенность векторов средних, поскольку отклонения оценок ковариационных матриц от их предельных значений существенно менее влияют на изменения вероятностей ошибок α и β, чем отклонения оценок векторов средних распределений значений вектора контролируемых параметров в различаемых классах образцов рассматриваемого электронного компонента от их реальных значений. Применение такого приближения неполного априорного знания допустимо, поскольку оно дает при средних объемах обучающих выборок несущественные отклонения значений вероятностей ошибок контроля от реальных, и, несомненно, целесообразно, так как требует существенно меньших, примерно в 20–30 раз, вычислительных затрат при расчете α и β, по сравнению со случаем полной априорной неопределенности. В этом случае решающее правило (1) записывается в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^{p}\left\{\frac{1}{\sigma_{0j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{0j}\right)^2 - \frac{1}{\sigma_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{1j}\right)^2 + n\ln\frac{\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2}\right\} \geq 0, \tag{10}$$

где $\hat{\bar{a}}_i = \left(1/m_i\right)\sum_{j=1}^{m_i}\bar{x}_j^{(i)}$ – оценки векторов средних распределений значений вектора контролируемых параметров в различаемых классах, а $\bar{x}_1^{(i)}, \ldots, \bar{x}_{m_i}^{(i)}$ – обучающие выборки, составленные из замеров вектора контролируемых параметров у каждого из m_i образцов исследуемого электронного

компонента, составляющих установочную партию для i-го класса. Для определения вероятности ошибки контроля первого рода α опять следует предположить, что замеры вектора контролируемых параметров, составляющие контрольную выборку, соответствуют классу S_0 и подчиняются p-мерному нормальному закону с вектором средних $\overline{a}_0$ и ковариационной матрицей $M_0 = diag\left(\sigma_{01}^2,...,\sigma_{0p}^2\right)$. Случайные величины, являющиеся слагаемыми суммы по j в левой части неравенства (10) и заключенные в фигурные скобки, независимы между собой в силу независимости контролируемых параметров. Поэтому для приведения левой части неравенства (10) к требуемому виду линейной комбинации случайных величин, имеющих центральные и нецентральные χ^2-распределения с различными числами степеней свободы, следует воспользоваться предложенными в [1] линейными и нелинейными декоррелирующими преобразованиями, после чего неравенство (10) принимает вид

$$\sum_{j=1}^{p}\left\{\left(1-\frac{1}{r_j}\right)\left[\chi_{n-1,0}^2\right]_j+\sum_{i=1}^{2}k_{ij}\sigma_{\chi_{ij}}^2\chi_{1,\left(a_{\chi_{ij}}/\sigma_{\chi_{ij}}\right)^2}^2+n\ln\frac{\sigma_{0j}^2}{\sigma_{1j}^2}\right\}\geq 0\,, \tag{11}$$

а вероятность ошибки контроля первого рода с помощью формулы Имхофа [2] определится как

$$\alpha=\frac{1}{2}-\frac{1}{\pi}\int_0^\infty\frac{\sin\Theta(u)}{u\rho(u)}du\,, \tag{12}$$

где

$$\Theta(u)=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\left\{n\ln r_j-(n-1)\operatorname{arctg}\left[\left(1-\frac{1}{r_j}\right)u\right]-\sum_{i=1}^{2}\left[\operatorname{arctg}\left(K_{ij}\sigma_{\chi_{ij}}^2u\right)+\frac{K_{ij}a_{\chi_{ij}}^2u}{1+K_{ij}^2\sigma_{\chi_{ij}}^4u^2}\right]\right\},$$

$$\rho(u)=\prod_{j=1}^{p}\left\{\left[1+\left(1-\frac{1}{r_j}\right)^2u^2\right]^{\frac{n-1}{4}}\prod_{i=1}^{2}\left(1+K_{ij}^2\sigma_{\chi_{ij}}^4u^2\right)^{\frac{1}{4}}\right\}\exp\left\{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\sum_{i=1}^{2}\frac{K_{ij}^2a_{\chi_{ij}}^2\sigma_{\chi_{ij}}^2u^2}{1+K_{ij}^2\sigma_{\chi_{ij}}^4u^2}\right\}.$$

Для получения формулы вероятности ошибки контроля второго рода β при средних объемах обучающих выборок, т.е. при учете априорной неопределенности векторов средних распределений значений вектора контролируемых параметров в различаемых классах образцов исследуемого изделия микроэлектроники, необходимо принять, что элементы контрольной выборки относятся к классу S_1 и подчиняются p-мерному нормальному закону с вектором средних $\overline{a}_1$ и ковариационной матрицей $M_1 = diag\left(\sigma_{11}^2,...,\sigma_{1p}^2\right)$. После осуществления линейных и нелинейных декоррелирующих преобразований, аналогичных преобразованиям, упомянутым выше при выводе формулы для α, и использования формулы Имхофа [2], формула для вычисления β будет иметь вид

$$\beta=\frac{1}{2}-\frac{1}{\pi}\int_0^\infty\frac{\sin\Theta(u)}{u\rho(u)}du\,, \tag{13}$$

где

$$\Theta(u)=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\left\{n\ln\frac{1}{r_j}-(n-1)\operatorname{arctg}\left[\left(1-r_j\right)u\right]-\sum_{i=1}^{2}\left[\operatorname{arctg}\left(K_{ij}\sigma_{\chi_{ij}}^2u\right)+\frac{K_{ij}a_{\chi_{ij}}^2u}{1+K_{ij}^2\sigma_{\chi_{ij}}^4u^2}\right]\right\},$$

$$\rho(u)=\prod_{j=1}^{p}\left\{\left[1+\left(1-r_j\right)^2u^2\right]^{\frac{n-1}{4}}\prod_{i=1}^{2}\left(1+K_{ij}^2\sigma_{\chi_{ij}}^4u^2\right)^{\frac{1}{4}}\right\}\exp\left\{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\sum_{i=1}^{2}\frac{K_{ij}^2a_{\chi_{ij}}^2\sigma_{\chi_{ij}}^2u^2}{1+K_{ij}^2\sigma_{\chi_{ij}}^4u^2}\right\},$$

где величины, входящие в формулы для Θ и ρ из (13), имеют тот же смысл, что и в формулах для вероятности ошибки первого рода α в (12).

При осуществлении контроля состояния образцов электронного компонента по нескольким параметрам на основе обучающих выборок, имеющих малые объемы, полученные выше формулы для вычисления вероятностей ошибок контроля, дают высокую погрешность, что определяет необходимость учета полной параметрической априорной неопределенности, т.е. необходимость считать вектора средних и ковариационные матрицы распределений значений вектора контролируемых параметров в различаемых классах образцов рассматриваемого электронного компонента неизвестными [1]. Для этого следует построить по классифицированным обучающим выборкам, $x_1^{(i)},...,x_{m_i}^{(i)}$ i = 0, 1, состоящим из замеров вектора контролируемых параметров у образцов, составляющих установочные партии: (по m_i изделий из i-го класса), их оценки максимального правдоподобия $\hat{\bar{a}}_i = \left(\hat{a}_{i1},...,\hat{a}_{ip}\right)$ и $\hat{M}_i = diag\left(\hat{\sigma}_{i1}^2,...,\hat{\sigma}_{ip}^2\right)$:

$$\hat{a}_{ij} = \frac{1}{m_i}\sum_{k=1}^{m_i} x_{kj}^{(i)} \ ; \ \hat{\sigma}_{ij}^2 = \frac{1}{m_i - 1}\sum_{k=1}^{m_i}\left(x_{kj}^{(i)} - \hat{a}_{ij}\right)^2 \ . \tag{14}$$

Для получения решающего правила эти оценки надлежит подставить в решающее правило (1), после чего оно примет окончательный вид

$$\sum_{j=1}^{p}\left\{\frac{1}{\hat{\sigma}_{0j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{0j}\right)^2 - \frac{1}{\hat{\sigma}_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{1j}\right)^2 + n\ln\frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2}\right\} \geq 0 \ . \tag{15}$$

Случайный вектор $\hat{\bar{a}}_i$ подчиняется p-мерному нормальному закону с вектором средних $\bar{a}_i$ и ковариационной матрицей $diag\left(\sigma_{i1}^2 / m_i,...,\sigma_{ip}^2 / m_i\right)$, а любая из случайных величин $\hat{\sigma}_{ij}^2$ может быть представлена в виде

$$\hat{\sigma}_{ij}^2 = \sigma_{ij}^2 w_{ij} \big/ \left(m_i - 1\right). \tag{16}$$

При этом каждая из случайных величин w_{ij}; j = 1, …, p, подчиняется центральному χ^2-распределению с m_i – 1 степенями свободы [1], а σ_{ij}^2; j = 1, …, p – неизвестные диагональные элементы ковариационной матрицы $M_i = diag\left(\sigma_{i1}^2,...,\sigma_{ip}^2\right)$ распределения значений вектора контролируемых параметров для i-го класса. С учетом (16) неравенство (15) принимает вид

$$\sum_{j=1}^{p}\left\{\frac{m_0 - 1}{w_{0j}\sigma_{0j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{0j}\right)^2 - \frac{m_1 - 1}{w_{1j}\sigma_{1j}^2}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{1j}\right)^2 + n\ln\frac{w_{0j}\sigma_{0j}^2\left(m_1 - 1\right)}{w_{1j}\sigma_{1j}^2\left(m_0 - 1\right)}\right\} \geq 0. \tag{17}$$

Случайные величины, входящие в (17) и соответствующие разным значениям индекса j, независимы в силу независимости выбранных контролируемых параметров. В [1] доказана независимость случайных величин w_{0j}, w_{1j}, $\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{0j}\right)^2$ и $\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \hat{a}_{1j}\right)^2$ для всех j, что с учетом независимости случайных величин из (17), соответствующих разным j, позволяет записать вероятности ошибок контроля первого и второго рода в виде

$$\alpha = \underbrace{\int_0^\infty\int_0^\infty ... \int_0^\infty\int_0^\infty}_{2p} P_{w_{01}w_{11}...w_{0p}w_{1p}}\left(V \geq 0 \middle| \bar{X}_i \in S_0\right)\prod_{j=1}^{p}\prod_{i=0}^{1} P_{w_{ij}}\left(Z_{ij}\right)\prod_{j=1}^{p}\prod_{i=0}^{1} dZ_{ij};$$

$$\beta = \underbrace{\int_0^\infty\int_0^\infty \ldots \int_0^\infty\int_0^\infty}_{2p} P_{w_{01}w_{11}\ldots w_{0p}w_{1p}}\left(V<0\middle|\bar{X}_i \in S_1\right)\prod_{j=1}^{p}\prod_{i=0}^{1} P_{w_{ij}}\left(Z_{ij}\right)\prod_{j=1}^{p}\prod_{i=0}^{1} dZ_{ij}, \tag{18}$$

где V – левая часть неравенства (17), а $P_{w_{01}w_{11}\ldots w_{0p}w_{1p}}\left(V \ge 0 \mid \bar{X}_i \in S_0\right)$ и $P_{w_{01}w_{11}\ldots w_{0p}w_{1p}}\left(V < 0 \mid \bar{X}_i \in S_1\right)$ – условные вероятности, вычисленные при фиксированных значениях случайных величин w_{ij}, $i = 0, 1$, $j = 1, \ldots, p$, а $P_{w_{ij}}\left(Z_{ij}\right)$ – плотности распределений случайных величин w_{ij}, имеющих центральные χ^2-распределения с $m_i - 1$ степенями свободы. Таким образом, для получения формул α и β следует определить вышеупомянутые условные вероятности. После проведения преобразований согласно [1], аналогичных приведенным выше, левая часть неравенства (17) приводится к линейной комбинации случайных величин, имеющих центральные и нецентральные χ^2-распределения с различными числами степеней свободы, а само неравенство принимает вид

$$\sum_{j=1}^{p}\left\{\lambda_{0j}\left[\chi^2_{n-1,0}\right]_j + \sum_{i=1}^{2}\lambda_{ij}\chi^2_{1,b_{ij}} + n\ln\frac{\sigma^2_{0j}w_{0j}\left(m_1-1\right)}{\sigma^2_{1j}w_{1j}\left(m_0-1\right)}\right\} \ge 0, \tag{19}$$

где величины λ_{0j}, λ_{1j}, λ_{2j}, b_{1j} и b_{2j} определяются в соответствии с [1], а формула для вероятности $P_{w_{01}w_{11}\ldots w_{0p}w_{1p}}\left(V \ge 0\left(\bar{X}_i \in S_0\right)\right.$ применения формулы Имхофа [2] к (19) имеет вид

$$P_{w_{01}w_{11}\ldots w_{0p}w_{1p}}\left(V \ge 0\middle|\bar{X}_i \in S_0\right) = P^{\alpha}_{w_{ij};i=0,1;j=1,\ldots,p} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\int_0^\infty \frac{\sin\Theta(u)}{u\rho(u)}du, \tag{20}$$

где

$$\Theta(u) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\left\{n\ln\frac{w_{1j}r_j\left(m_0-1\right)}{w_{0j}\left(m_1-1\right)} - (n-1)\operatorname{arctg}\left(\lambda_{0j}u\right) + \sum_{i=1}^{2}\left[\operatorname{arctg}\left(\lambda_{ij}u\right) + \frac{b_{ij}\lambda_{ij}u}{1+\lambda^2_{ij}u^2}\right]\right\};$$

$$\rho(u) = \prod_{j=1}^{p}\left\{\left(1+\lambda^2_{0j}u^2\right)^{\frac{n-1}{4}}\prod_{i=1}^{2}\left(1+\lambda^2_{ij}u^2\right)^{1/4}\right\}\exp\left\{\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}\sum_{i=1}^{2}\frac{\lambda^2_{ij}b_{ij}u^2}{1+\lambda^2_{ij}u^2}\right\}.$$

Для получения второй подынтегральной вероятности из (18) следует проделать с V аналогичные преобразования, предположив, что $\bar{x}_i \in S_1$, $i = 1, \ldots, n$, в итоге получается

$$Pw_{01}w_{11}\ldots w_{0p}w_{1p}\left(V<0\left(\bar{X}_i \in S_1\right)\right. = P^{\beta}_{w_{ij};i=0,1;j=1,\ldots,p} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\int_0^\infty \frac{\sin\Theta(u)}{u\rho(u)}du, \tag{21}$$

где Θ и ρ определяются, как и в (20), только r_j следует заменить на r_j^{-1}, а величины λ_{ij} и b_{ij} определить согласно [1].

Формулы (20)–(21) позволяют вычислять вероятности ошибок контроля состояния образцов изделия микроэлектроники с использованием для его осуществления произвольного числа p контролируемых информативных параметров при малых обучающих выборках. При неограниченном увеличении m значения α и β, рассчитанные в приближениях полной априорной неопределенности сначала приближаются к соответствующим вероятностям при неполном априорном знании (формулы (12) и (13)), а затем вместе с ними стремятся к значениям, определенным в приближении полного априорного знания (формулы (6) и (9)) [1]. При этом, чем больше число параметров p, тем быстрее с ростом m сближаются значения вероятностей ошибок контроля, рассчитанные при различных степенях априорной неопределенности. С ростом n α и β монотонно убывают. При фиксированном n вероятности ошибок контроля быстро монотонно убывает с ростом p, приближаясь к нулю. Следует отметить, что для большей наглядности анализа зависимости α и β от p целесо-

образно принять распределения параметров в пределах одного класса подобными, т.е. величины d_j и r_j не зависят от j потому, что исследование влияния на α и β различий d_j и r_j при различных значениях индекса j содержится в [1], в части, посвященной оценке информативности контролируемых параметров и выбору среди них наиболее информативных. Для случая подобно распределенных параметров использование для осуществления контроля состояния образцов электронного компонента набора из p таких параметров практически эквивалентно увеличению объема контрольной выборки примерно в p раз. Этот факт также объясняет быстрое убывание α и β с ростом p. Зависимости α и β от $d_j = d$ и $r_j^{-1} = r^{-1}$ в p-мерном случае аналогичны подобным зависимостям в одномерном случае с той лишь разницей, что графики α и β, соответствующие большим p, круче и лежат ниже.

Следует отметить, что $2p$-мерные интегралы в (20) при практических расчетах вычислялись по методу Монте-Карло. Этот метод, как отмечалось в [1], при больших p наиболее экономичен с точки зрения вычислительных затрат. Однако целесообразно получить приближенную формулу для вычисления α и β при полной априорной неопределенности. Для этого в [3] предлагается разложить α из (20) в ряд Тейлора по переменным $y_{ij} = w_{ij}(m_i - 1)$ и, оставив в этом разложении члены, содержащие первые и вторые частные производные, почленно проинтегрировать оставшуюся сумму, предварительно заменив χ^2-распределения нормальными $N((m_i - 1), 2(m_i - 1))$. В результате все слагаемые, содержащие первые и смешанные вторые частные производные, зануляются, а итоговая формула принимает вид [4, 5]

$$\alpha \approx P^{\alpha}_{\left(w_{ij}=m_i-1\right)i=0,1;\, j=1,\ldots,p} + \sum_{i=0}^{1}\sum_{j=1}^{p}\left[\left.\frac{\partial^2 P^{\alpha}}{\partial y_{ij}^2}\right|_{w_{ij}=m_i-1}\cdot\frac{1}{m_i-1}\right]. \qquad (22)$$

Таким образом, появляется возможность получить оценки вероятности ошибок селекции импортозамещающих электронных компонентов, что обеспечивает высокую надежность вновь создаваемой электронной аппаратуры ответственного назначения [6–8].

Список литературы

1. Безродный, Б. Ф. Адаптивные системы контроля изделий микроэлектроники на ПЭВМ / Б. Ф. Безродный, Я. А. Фомин. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 356 с.
2. Imhof, J. P. Computing the distribution of quadratic forms in normal variables / J. P. Imhof // Biometrika. – 1961. – V. 48, № 3.
3. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин ; под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 479 с.
4. Садыхов, Г. С. Расчет и оценка вероятностей опасных и безопасных состояний техногенно-опасного объекта / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, И. А. Бабаев // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4. – С. 69–77.
5. Северцев, Н. А. Моделирование оценки математического ожидания дисперсии случайных функций характеристик сложной технической системы / Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3. – С. 16–21.
6. Бойко, О. Г. Методология оценки вероятности катастрофических отказов функциональных систем самолетов / О. Г. Бойко, Е. А. Фурманова // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3. – С. 7–13.
7. К проблеме оценки остаточного ресурса объектов железнодорожной автоматики и телемеханики / Б. Ф. Безродный, А. В. Орлов, А. С. Голубев, Д. Н. Болотский // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2. – С. 34–39.
8. Лушпа, И. Л. Модели интенсивности отказов виброизоляторов для электронных средств / И. Л. Лушпа, В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1. – С. 50–57.

Безродный Борис Федорович
доктор технических наук, профессор,
главный инженер,
Проектно-конструкторско-технологическое бюро

Bezrodnyy Boris Fedorovich
doctor of technical sciences, professor,
chief engineer,
Design-technological bureau of railway automation

железнодорожной автоматики и телемеханики
(105082, Россия, г. Москва,
Переведеновский пер., 21/9)
(849-9)260-01-19
E-mail: boris.bezrodny@yandex.ru
Майоров Сергей Алексеевич
научный сотрудник,
Межрегиональное общественное учреждение
«Институт инженерной физики»
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,
Б. Ударный пер., 1 «А»)
8(4967)35-31-93
E-mail: info@iifrf.ru

Аннотация. При замене импортных электронных компонентов, применяемых в ответственной электронной аппаратуре, на отечественные аналоги возникает проблема обеспечения требуемого уровня ее надежности. В силу нестабильности технологического процесса изготовления качество, надежность и значения параметров этих аналогов имеют больший, по сравнению с импортными компонентами, разброс. Поэтому на практике оказывается необходимым проведение предварительной селекции их образцов с целью выбора наиболее приемлемых для изготовления конкретного типа электронной аппаратуры. Такую процедуру предлагается проводить с помощью статистического распознавания, считая из-за большого числа влияющих факторов распределения нормальными. Данная статья посвящена расчету вероятностей ошибок такой селекции.

Ключевые слова: электронная аппаратура, надежность, импортозамещение, статистический анализ, селекция, контроль.

and remote control
(105082, 21/9 Perevedenovskiy lane, Moscow, Russia)

Mayorov Sergey Alekseevich
research associate,
Inter-regional public institution
«Institute of engineering physics»
(142210, 1 «A» B. Udarniy lane, Moscow region,
Serpukhov city, Russia)

Abstract. When you replace the imported electronic components, used in electronic responsible equipment, for russian analogues raised the problem of providing the required level of its reliability. Because of the instability of the technological process of manufacturing quality, reliability, and parameter values of these analogues have greater, compared with imported components, variability. In practice, therefore, is it necessary to conduct a preliminary selection of samples with a view to selecting the most appropriate for a particular type of electronic equipment. Such a procedure is performed using statistical pattern recognition, considering the large number of influencing factors of normal distribution. This article focuses on the calculation of probabilities of selection error.

Key words: electronics, reliability, import substitution, statistical analysis, selection, control.

УДК 62-503.5
Безродный, Б. Ф.
К оценке вероятности ошибок селекции импортозамещающих электронных компонентов / Б. Ф. Безродный, С. А. Майоров // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 30–37.

УДК 621.3.087.92

УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОТ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В ИНТЕГРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ В ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ

В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев

Рынок интегрирующих АЦП сегодня представлен преобразователями сигма-дельта архитектуры (ΣΔ-АЦП) и преобразователями напряжение-частота (ПНЧ). На отечественном рынке средств измерений (СИ) также продолжают применяться интегрирующие преобразователи многотактного типа (многотактного интегрирования).

Преобразователи напряжение-частота отличаются малыми габаритными размерами на кристалле, малым энергопотреблением, высокой экономичностью. Разрядность СИ на базе ПНЧ доходит до 16 бит. Данные преобразователи применяются, как правило, в специализированных областях, например, в системах телеметрии, где устанавливаются непосредственно на объекте контроля, и связываются с измерителем частоты по телеметрическому каналу связи (при этом частота, как унифицированный сигнал, характеризуется повышенной помехоустойчивостью при передаче по линиям связи) [1].

При удовлетворении имеющихся требований по быстродействию ΣΔ-АЦП практически во всех случаях наиболее полно соответствуют совокупности требований по точности, надежности и простоте реализации. Разрядность выпускаемых микросхем ΣΔ-АЦП достигает 32 бит (например, ADS1262). Не последнюю роль в их господстве на рынке интегрирующих преобразователей играет возможность производства по технологии изготовления цифровых микросхем [1–4].

Следует отметить, что теория и практика ΣΔ-АЦП являются зарубежной разработкой, и основные достижения в данной области, а также конкретные архитектуры преобразователей, закреплены патентами США и Европы, принадлежащими фирмам производителям. Для построения отечественных СИ прецизионного класса, по мнению авторов, в качестве альтернативы алгоритмам ΣΔ-преобразования при устранении определенных недостатков могут использоваться алгоритмы интегрирующего преобразования в относительный интервал времени [5].

Рассмотрим алгоритм интегрирующего преобразования в относительный интервал времени с двумя пороговыми напряжениями (рис. 1). В алгоритме развертывающая функция $R(t)$ формируется поочередным интегрированием суммы или разности входного U_x и опорного U_0 напряжений. Смена полярности опорного напряжения выполняется в моменты времени, соответствующие началу очередного такта синхронизации T_0 (показаны вертикальными курсивными линиями), при условии, что на предыдущем такте синхронизации развертывающая функция $R(t)$ пересекла положительный или отрицательный пороговый уровень $U_п$.

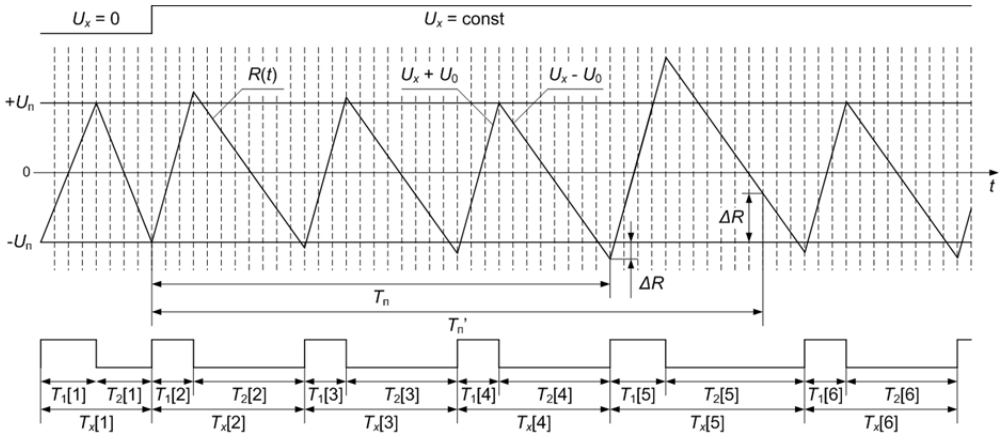


Рис. 1. Временные диаграммы работы интегрирующего АЦП с двумя пороговыми напряжениями

Существенными недостатками, ограничивающими практическое применение описанного алгоритма, являются:

1) наличие длительного переходного процесса, возникающего при подключении или скачкообразном изменении входной величины;

2) наличие методической погрешности от краевых эффектов.

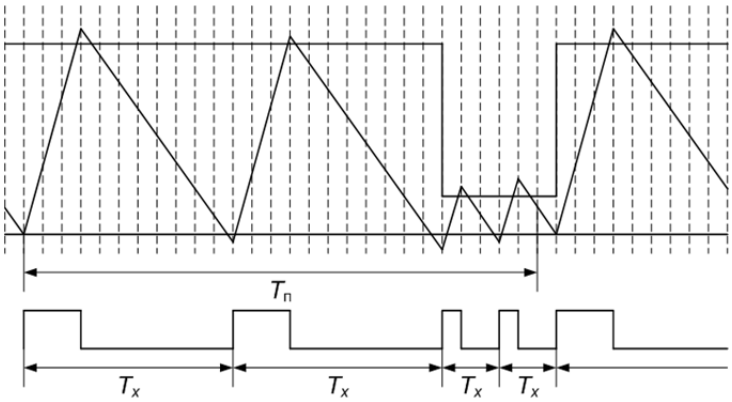
Методическая погрешность преобразования интегрирующего АЦП в общем случае определяется отличием от нуля разности между значениями развертывающей функции $R(t)$ в начале и конце интервала преобразования:

$$R(t_к) - R(t_н) \neq 0.$$

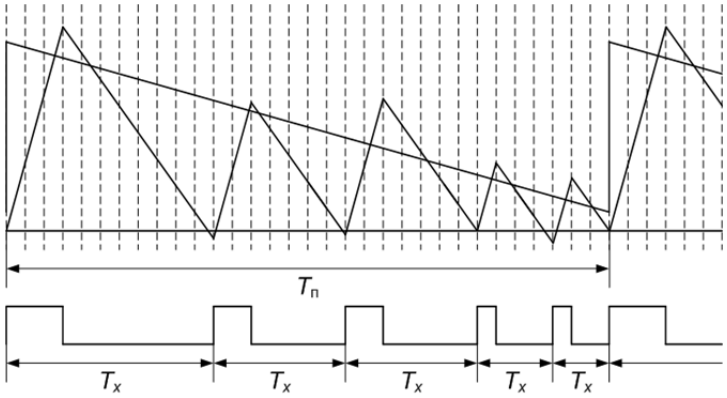
При этом выделяют методическую погрешность квантования и методическую погрешность от краевых эффектов. Первая определяется величиной T_0 и не превышает $\Delta R_{max} = \frac{2U_0T_0}{\tau}$, где τ – постоянная времени интегратора. Погрешность от краевых эффектов состоит в асинхронности частных T_x и полных $T_п$ циклов преобразования и по своей величине может существенно превосходить погрешность квантования. На временной диаграмме (рис. 1) интервалы преобразования $T_п$' и $T_п$ характеризуются соответственно наличием и отсутствием данной погрешности [5].

Длительность частных циклов T_x для различных значений преобразуемого напряжения U_x будет различной, более того, при возникновении переходного процесса, величина T_x будет изменяться и при неизменности U_x (интервал T_x [6] на рис. 1). Таким образом, в случае фиксированной длительности интервала преобразования $T_п$ без принятия специальных мер обеспечить отсутствие погрешности от краевых эффектов не представляется возможным.

С целью снижения погрешности от краевых эффектов осуществляют уменьшение амплитуды развертывающей функции $R(t)$ за счет изменения величины порогового напряжения в процессе преобразования [4]. При этом известны способы ступенчатого изменения $U_п$, например в пять раз (рис. 2,*а*), способы линейного уменьшения (рис. 2,*б*), а также их комбинации [4, 7].



а)



б)

Рис. 2. Временные диаграммы, иллюстрирующие способы уменьшения погрешности от краевых эффектов

Практической реализации данных способов присущи известные недостатки: возрастает число переключений опорного напряжения U_0, приходящееся на полный цикл преобразования. Увеличение числа переключений опорного напряжения служит источником инструментальной погрешности ввиду нестабильности фронтов импульсов опорного напряжения (следствие конечного времени перехода коммутационных элементов из одного состояния в другое), а также из-за ограниченной полосы пропускания операционного усилителя интегратора [4].

Использование последнего алгоритма сопряжено с техническими трудностями ввиду необходимости постепенного уменьшения разности двух пороговых уровней, таким образом, чтобы она достигла минимума (например, нуля) в заранее заданный (при фиксированном $T_п$), а иногда и заранее неизвестный момент времени (например, при подстройке интервала преобразования под период сетевой помехи) [8, 9].

Для решения задачи уменьшения погрешности от краевых эффектов предлагается осуществлять изменение пороговых напряжений, не по заранее заданному правилу, а на основе информации о преобразуемой величине, получаемой в процессе преобразования. Временная диаграмма работы соответствующего алгоритма интегрирующего преобразования представлена на рис. 3. Формирование напряжений пороговых уровней осуществляется на частных интервалах преобразования $T_{пч}$, каждый из которых состоит из целого числа частных циклов интегрирования T_x. Причем величина пороговых уровней рассчитывается для каждого нового частного интервала интегрирования согласно выражению

$$U_п = \left| \frac{U_x^2 - U_0^2}{U_0} \right|, \qquad (1)$$

где U_x – величина входного напряжения, вычисленная за k = 1, 2, … (k – целое число) предшествующих частных интервалов преобразования.

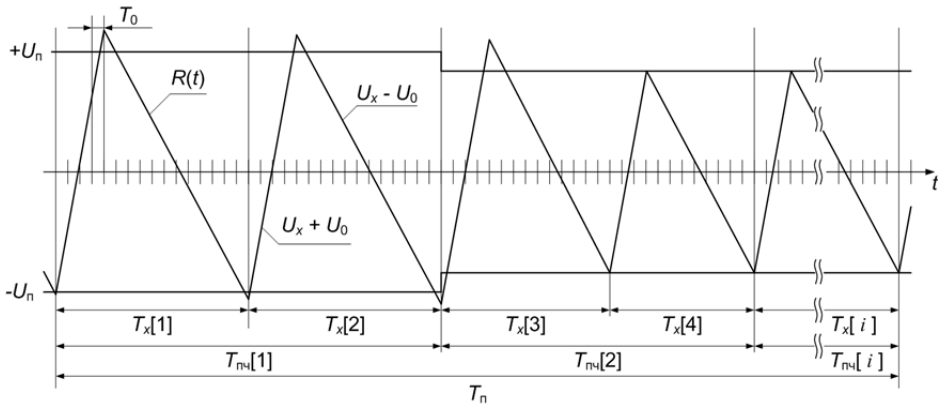


Рис. 3. Временная диаграмма работы, иллюстрирующая предложенный способ формирования пороговых напряжений

Рассмотрим предлагаемый алгоритм на конкретном примере. Пусть $U_0 = U_п$ = 10В, $\tau = 5T_0$, при U_x = 0В длительность частного цикла интегрирования $T_x = T_1 + T_2 = (10 + 10)T_0 = 20T_0$, при подаче U_x = 3В длительность первого частного цикла составит: $T_x = (8 + 15)T_0 = 23T_0$. При идеальной подстройке согласно выражению (1) пороговое напряжение будет равно $U_п$ = 9,1В. Длительность $T_1 = 2U_п\tau / (U_x + U_0) = 7T_0$, а $T_2 = 2U_п\tau / (U_x - U_0) = 13T_0$, следовательно, $T_x = 20T_0$ = const.

Таким образом, в случае идеальной подстройки пороговых напряжений обеспечивается постоянство длительностей частных циклов T_x, а время переходного процесса определяется временем, затрачиваемым на вычисление нового значения $U_п$, после изменения U_x. При этом задание фиксированной длительности интервала преобразования $T_п$ в виде целого числа частных интервалов интегрирования T_x обеспечит устранение погрешности от краевых эффектов.

Список литературы

1. Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер ; пер. с англ. ; под ред. Е. Б. Володина. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.

2. Официальный сайт фирмы Texas Instruments. – URL: http://www.ti.com, свободный (дата обращения: 01.10.2014).
3. Шахов, Э. К. ΣΔ-АЦП: Процессы передискретизации, шейпинга шума квантования и децимации / Э. К. Шахов // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 50–57.
4. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 184–187.
5. Шахов, Э. К. Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
6. Ашанин, В. Н. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : моногр. / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувыкин, Э. К. Шахов. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2009. – 214 с.
7. Лысенко, А. В. Аппаратное обновление электронных устройств на основе 3PLD кристаллов / А. В. Лысенко, Д. И. Морозов, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2011. – Т. 2. – С. 186–187.
8. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
9. Yurkov, N. K. Measurement of the parameters of three-element nonresonance two-terminal networks at a fixed frequency / N. K. Yurkov, M. V. Klyuev, E. V. Isaev // Measurement Techniques. – 2013. – V. 55. – February. – Issue 6, 11. – P. 1267–1274.

Юрманов Валерий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
(841-2)49-60-09
E-mail: YurmanovVA@gmail.com

Пискаев Кирилл Юрьевич
старший преподаватель,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
(841-2)49-60-09
E-mail: PiskaevK@gmail.com

Аннотация. Алгоритмы интегрирующего преобразования в относительный интервал времени без пропусков информации на сегодняшний день не находят широкого применения в измерительных системах прецизионного класса. Причина этого состоит в наличии переходного процесса и методической погрешности от краевых эффектов, присущих данным алгоритмам. При этом известные способы уменьшения указанной погрешности существенно увеличивают требования к характеристикам применяемой элементной базы, а следовательно, и технологии производства. При устранении данных недостатков интегрирующие АЦП на базе рассматриваемых алгоритмов могут составить конкуренцию господствующим на рынке ΣΔ-АЦП. В работе предлагается решение поставленной задачи для алгоритма интегрирующего преобразования в относительный интервал времени, состоящее в способе формирования пороговых напряжений на основе оценки входной величины непосредственно в процессе преобразования.
Ключевые слова: аналого-цифровые преобразовате-

Yurmanov Valeriy Anatol'evich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technologies and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11 Baydukova travel / Gagarina street,
Penza, Russia)

Piskaev Kirill Yur'evich
senior lecturer,
sub-department of information technologies and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11 Baydukova travel / Gagarina street,
Penza, Russia)

Abstract. Algorithms of integrating conversion in the relative time interval today are not widely used in precision measuring systems. Because these algorithms have a long transition process and systematic error of edge effects. Known methods for reducing this error significantly increases the performance requirements applicable electronic elements, and therefore the production technology. With the elimination of these drawbacks ADC based on these algorithms can compete with the ΣΔ-ADC. This paper proposes a solution to the problem consists in the process of formation of the threshold voltages on the basis of a rough measurement of the input voltage directly to the conversion process.
Key words: analog-to-digital converters integrating type;

ли интегрирующего типа; погрешность от краевых эффектов; методические погрешности АЦП; повышение точности интегрирующих АЦП; переходные процессы в интегрирующих преобразователях.

error of edge effects; methodological ADC errors; improving the accuracy of ADC; transient processes in integrating converters.

УДК 621.3.087.92

Юрманов, В. А.

Уменьшение погрешности от краевых эффектов в интегрирующих преобразователях в относительный интервал времени / В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 38–42.

УДК 519.876.5

ИНФОРМАЦИОННО-СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА ИНЕРЦИОННОГО ТИПА

М. Ю. Михеев, Е. А. Гудкова, А. А. Лепешев

Создание и развитие новых технологий и производственных процессов привели к возросшей потребности измерения расхода жидкостей, протекающих в напорных и безнапорных трубопроводах. Измерение расхода и массы жидкости широко применяется как в товароучетных и отчетных операциях, так и при контроле, регулировании и управлении технологическими процессами. В качестве объектов использования могут выступать предприятия промышленности, транспортные средства (суда, самолеты и космические корабли) и др. Информатизация процессов сбора и обработки данных с кориолисова расходомера [1] необходима для измерения массового расхода, плотности и температуры.

Обобщенная структурная схема системы сбора и обработки данных для измерения расхода и массы жидкости на базе кориолисова расходомера инерционного типа [2] представлена на рис. 1. Модуль сбора данных должен обеспечивать снятие и оцифровку измерительных сигналов с четырех датчиков и их передачу в модуль обработки данных. Таким образом, модуль состоит из четырех измерительных каналов – каналов ввода аналоговой информации. Структурная схема одного измерительного канала приведена на рис. 1. Она состоит из тензометрического датчика (Д), нормирующего усилителя (НУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и микроконтроллера (МК). НУ предназначен для преобразования дифференциальных сигналов, получаемых с мостовой схемы тензометрического датчика, в нормированный измерительный сигнал. Другими словами НУ осуществляет согласование датчика с АЦП.

Микроконтроллер осуществляет управление работой измерительного канала. Основной его функцией является получение цифровых данных с выхода АЦП и передача их в канал связи (КС).

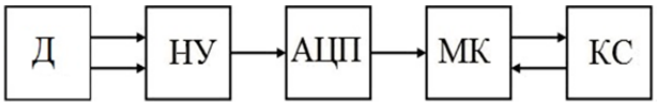


Рис. 1. Структурная схема измерительного канала

Требования к датчику:
– диапазон измерения давления – от –200 до 200 кПа;
– точность измерения давления – до 0,1 %;
– точность измерения температуры ± 0,5 °С;
– частотный диапазон – от 0 до 100 Гц.

Требования к АЦП:
– разрядность – не менее 20 бит для входного диапазона ± 5 В;
– быстродействие – не менее 1 кГц для обеспечения минимум 10 отсчетов на период сигнала.

В зависимости от реализации конструкции при решении конкретной задачи и габаритных размеров кориолисова расходомера модуль сбора данных может иметь структуру, представленную на рис. 2.

Однако данный вариант реализации значительно увеличивает требования к вычислительной мощности и быстродействию модуля обработки данных вследствие необходимости опроса четырех каналов ввода в режиме реального времени.

Преимуществом данной реализации модуля является возможность обработки получаемых измерительных сигналов, вычисление и передача в канал связи непосредственно значений измеряемых параметров. Таким образом, модуль обработки данных при наличии запоминающего

устройства в своем составе может функционировать в автономном режиме и фактически является законченным устройством.

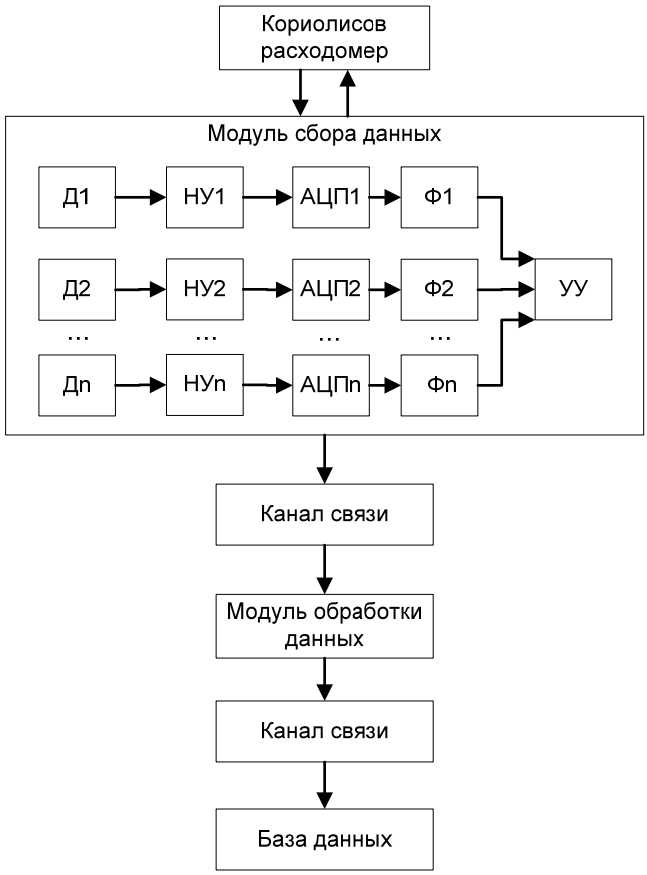


Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы

Кроме того, модуль обработки должен располагаться в непосредственной близости от самого расходомера или совмещен с ним в связи с ограниченностью протяженности линий связи между датчиками и данным модулем, обусловленной действием помех и поддерживаемыми АЦП протоколами связи.

Применение структуры модуля сбора данных, показанной на рис. 2, позволяет реализовать каждый измерительный канал в виде интеллектуального датчика, поддерживающего необходимые сетевые протоколы передачи данных, а модуль обработки реализовать на основе стандартных вычислительных средств. Таким образом, при использовании распространенных сетевых технологий модуль обработки может располагаться на любом расстоянии от расходомера. Другими словами, построение модуля сбора данных на основе интеллектуальных датчиков позволит получить преимущества сенсорных сетей [3, 4].

Далее следует передача сигнала в модуль обработки данных, где осуществляется фильтрация сигнала.

Основным компонентом модуля обработки данных является фильтр, задача которого – очистить входной сигнал от зашумленности, его выбор обусловливается характеристиками фильтруемого сигнала. Учитывая то, что форма и параметры сигнала практически не изменяются, в связи с тем, что расходомер работает на заранее определенной частоте [5–16], для известной измеряемой жидкости, то для фильтрации сигнала может быть использован полосовой фильтр. После модуля обработки данные передаются через канал связи в базу данных (БД) системы.

Объектно ориентированное моделирование [1–3] системы на языке *UML* в информационной среде *Enterprise Architect*.

Рассмотрим диаграмму вариантов использования, представленную на рис. 3 и описывающую функциональное назначение системы.

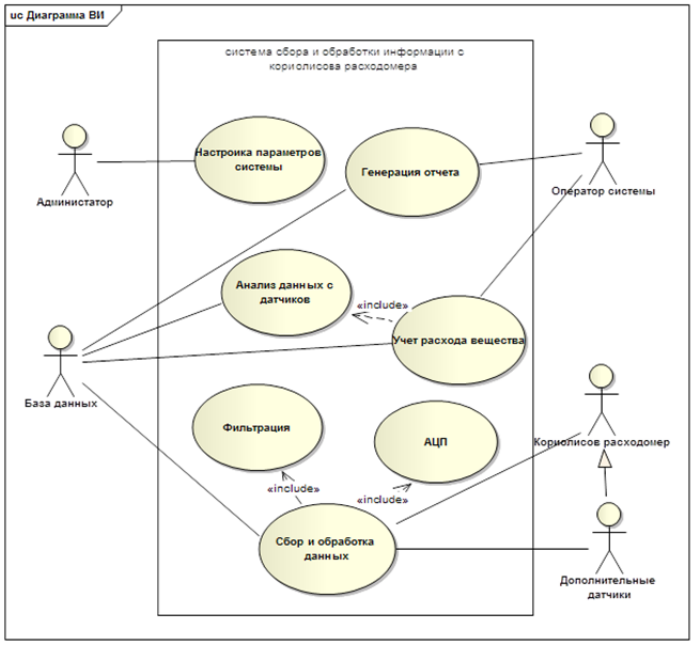


Рис. 3. Диаграмма вариантов использования системы

Система представляется в виде множества актеров (дополнительные датчики (например, датчик температуры), кориолисов расходомер, база данных, оператор, администратор), взаимодействующих с системой с помощью вариантов использования. При этом под актером понимается любая сущность, взаимодействующая с системой извне (человек, техническое устройство, программа). Вариант использования служит для описания сервисов, которые система предоставляет актеру.

Для проектирования системы использована технология *UML*-моделирования. Разработанная БД (рис. 4) системы состоит из следующих таблиц:

– сигнал (Signal);

– модуль обработки данных (Data processing);

– устройства ввода данных: кориолисов расходомер и дополнительные датчики (Device input data);

– данные оператора (User);

– файл (File).

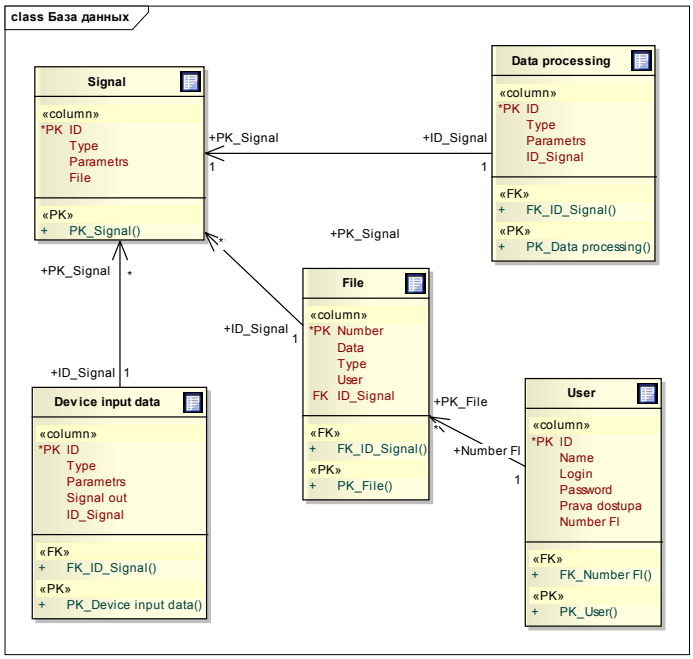


Рис. 4. База данных

В разработанной БД таблица *Data processing* по внешнему ключу *FK ID_Signal* связана с первичным ключом *PK_Signal*() таблицы *Signal*. Все объекты таблицы *Data processing* с ролью *Signal* должны участвовать в некотором экземпляре данной ассоциации, причем в каждом экземпляре ассоциации может участвовать ровно один объект таблицы с данной ролью. На схеме это указывается единицей рядом со стрелкой ассоциации.

Таблица данных *File* по внешнему ключу *ID_Signal* связана с первичным ключом *PK_Signal* таблицы *Signal*. Кратность данной ассоциации («1..*») говорит о том, что все объекты таблицы *Signal* с ролью *File* должны участвовать в некотором экземпляре данной ассоциации, и в каждом экземпляре ассоциации должен участвовать хотя бы один объект.

По внешнему ключу *ID_Signal* таблица *Device input data* также связана с первичным ключом *PK_Signal* таблицы *Signal*. Таблица данных *User* по внешнему ключу *Number_Fl* связана с первичным ключом *PK_File* таблицы *File*. Моделирование динамики системы проводится с использованием диаграмм деятельности и последовательности. На диаграмме деятельности (рис. 5) представлена организация работы системы.

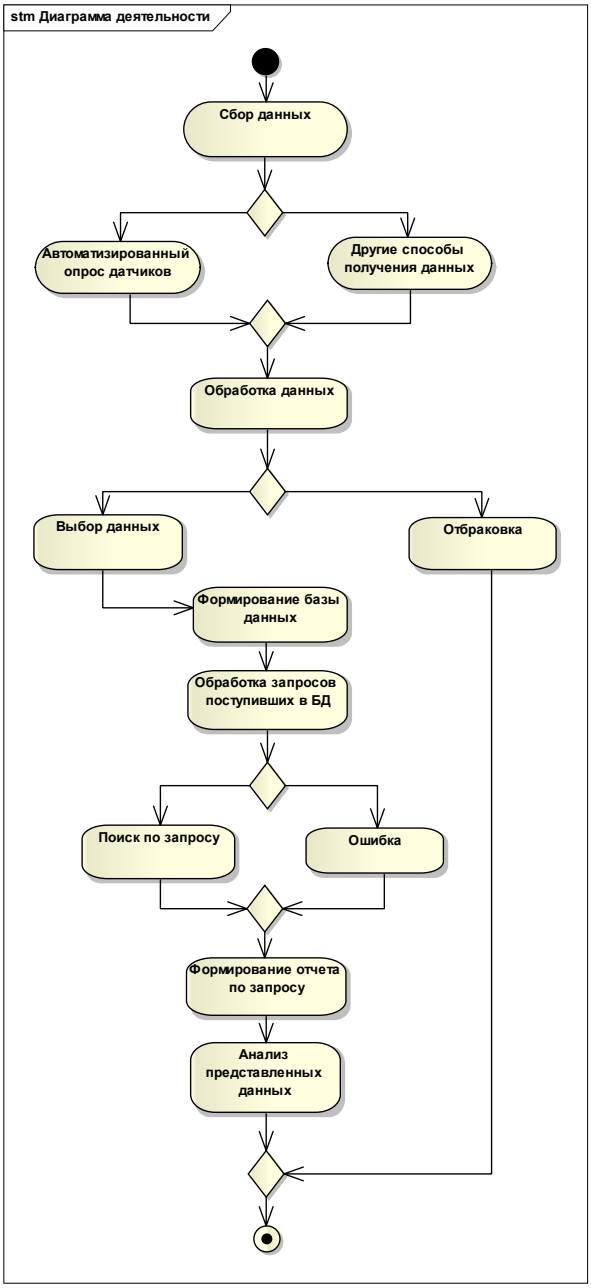


Рис. 5. Диаграмма деятельности

Осуществляется сбор данных с помощью автоматического опроса датчиков (заложен вариант других способов получения данных). Эти данные проходят обработку и из них формируется БД. В сформированную БД могут поступать различные запросы, которые БД должна обработать и сформировать ответы на запросы, при этом не всегда возможно найти информацию, которую запрашивают. Представленные данные анализируются оператором.

На рис. 6 изображена диаграмма последовательности для процессов сбора и обработки данных, представляющая собой взаимодействия элементов модели в форме последовательности сообщений и соответствующих событий на линиях жизни объектов.

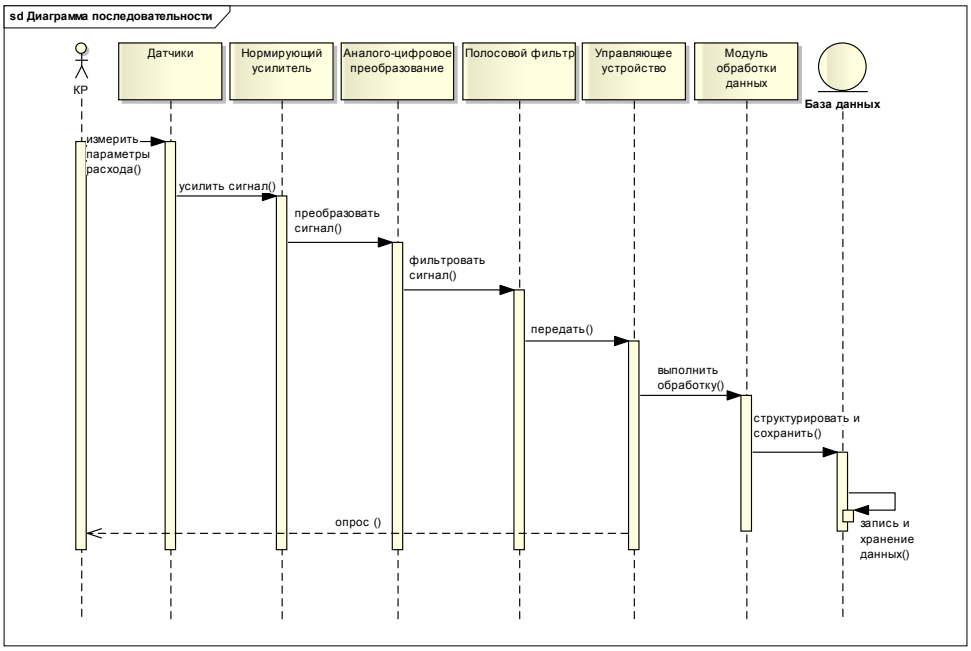


Рис. 6. Диаграмма последовательности для процессов сбора и обработки данных

На данной диаграмме представлен кориолисов расходомер и дополнительные датчики, с которых осуществляется сбор данных о параметрах расхода вещества. Далее данные подаются на нормирующий усилитель и проходят аналого-цифровое преобразование. Затем полосовой фильтр очищает сигнал от шумов. Отфильтрованный сигнал попадает на устройство управления, после чего данные проходят обработку и записываются в БД.

На рис. 7 представлена диаграмма последовательности для процесса работы оператора с БД.

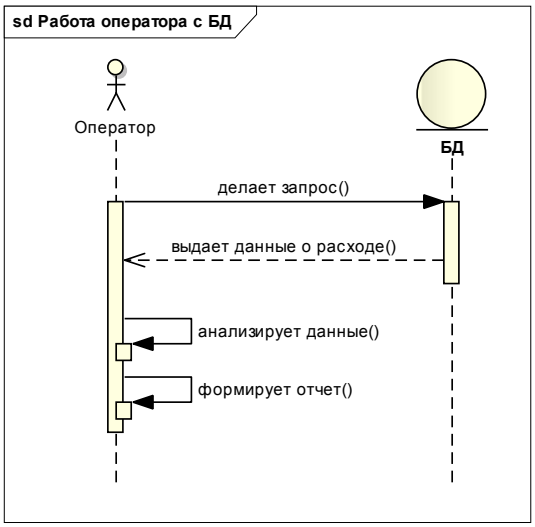


Рис. 7. Диаграмма последовательности для процесса работы оператора с базой данных

Оператор может направлять запросы, БД выдает сведения на поступивший запрос, оператор анализирует представленные данные и при необходимости формирует отчет.

Диаграмма компонентов, служащая для представления программных компонентов и зависимостей между ними, представлена на рис. 8.

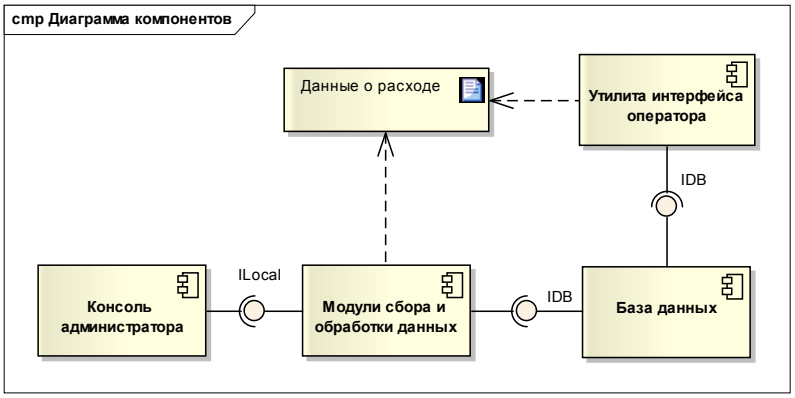


Рис. 8. Диаграмма компонентов

Компонент «консоль администратора» обращается к компоненту «модуль сбора и обработки данных, который предоставляет ему интерфейс *ILocal*.

Компонент «модуль сбора и обработки данных» имеет обращение к базе данных через интерфейс *IDB* и отношение зависимости с *artifact* «Данные о расходе». База данных в свою очередь предоставляет интерфейс компоненту «утилита интерфейса оператора» через интерфейс *IDB*, данный компонент также связан отношением зависимости с *artifact* «Данные о расходе».

Таким образом, были разработаны следующие информационно-структурные модели: структурная схема измерительного канала, обобщенная структурная схема системы сбора и обработки данных с кориолисова расходомера инерционного типа; проведено объектно ориентированное моделирование системы в виде совокупности диаграмм языка *UML*.

Список литературы

1. Mikheev, M. U. On the multilevel information model of behavior of groups of autonomous intelligent agents for biomedical systems / M. U. Mikheev, V. V. Istomin, T. V. Istomina // Инновационные информационные технологии : III Междунар. науч.-практ. конф. / Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ. – Прага, Чехия, 2014. – № 1. – С. 385–395.
2. Гудков, К. В. Объектно-ориентированное моделирование информационной системы сбора, обработки и хранения данных / К. В. Гудков, Е. А. Гудкова // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 199–203.
3. Гудков, К. В. Разработка подсистемы сбора данных для кориолисова расходомера / К. В. Гудков, К. Ю. Пискаев и др. // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2010. – № 12. – С. 41–45.
4. Жашкова, Т. В. Обобщенная процедура синтеза алгоритмов нейросетевой идентификации на базе теории целых функций экспоненциального типа / Т. В. Жашкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 4 (24). – URL: http://www.aspu.ru/images/File/Izdatelstvo/Prikspiiskii %204(24)2013/94-101.pdf.
5. Михеев, М. Ю. Inreasing the precision of metrological characteristics of smart sensors in large scale monitoring systems / М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев и др. // Инновационные информационные технологии : III Междунар. науч.-практ. конф. / Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ. – Прага, Чехия, 2014. – № 2. – С. 370–375.
6. Михеев, М. Ю. Интегрирующие АЦП с частотно-импульсной модуляцией / М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 315–318.
7. Михеев, М. Ю. Построение имитационных моделей нейросетевой идентификации сигналов с датчиков на ПАВ / М. Ю. Михеев, С. А. Исаков, Е. Н. Мурашкина // Современные информационные технологии : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2014. – Вып. 14. – С. 60–65.
8. Михеев, М. Ю. Применение UML-моделирования для управления структурной динамикой сложных технических систем нейросетевой идентификации сигналов сложной формы / М. Ю. Михеев, С. А. Иса-

ков, Е. Н. Мурашкина // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 244–247.
9. Михеев, М. Ю. Разработка диаграммы вариантов использования датчиков на ПАВ / М. Ю. Михеев, С. А. Исаков, Е. Н. Мурашкина // Современные информационные технологии : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2014. – Вып. 14. – С. 57–60.
10. Михеев, М. Ю. Реализация модельно-ориентированного подхода при проектировании системы сбора данных / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, Е. А. Гудкова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 304. – URL: www.science-education.ru/120-16833.
11. Михеев, М. Ю. Реализация модельно-ориентированного подхода при проектировании систем сбора данных / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, Е. А. Гудкова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.– С. 304.
12. Михеев, М. Ю. Имитационное моделирование нейросетевой идентификации сигналов сложной формы / М. Ю. Михеев, С. А. Исаков, Е. Н. Мурашкина // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 203–206.
13. Михеев, М. Ю. Синтез элементов поверочных систем дозирования компонентов топлива / К. В. Гудков, М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2010. – № 3 (28). – С. 55–60.
14. Системы поверки кориолисовых расходомеров / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, В. А. Юрманов, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2012. – № 8. – С. 51–54.
15. A method of automatic verification of Coriolis flowmeters in the field / N. K. Yurkov, K. V. Gudkov, M. Yu. Mikheev, V. A.Yurmanov // Measurement Techniques. – 2012. – V. 55. – May. – Issue 2. – P. 151–155.
16. Systems of Coriolis flowmeters in the field / N. K. Yurkov, K. V. Gudkov, M. Yu. Mikheev, V. A.Yurmanov // Measurement Techniques. – 2012. – V. 55. – November. – Issue 6. – P. 132–139.

Михеев Михаил Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет,
(440039, Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 13)
(8412) 49-60-09
E-mail: mix1959@gmail.com

Гудкова Екатерина Александровна
ассистент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет,
(440039, Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 13)
(8412) 49-60-09
E-mail: vea.11@yandex.ru

Лепешев Андрей Алексеевич
старший инженер,
военное представительство 5021 МО РФ,
экстерн,
Пензенский государственный
технологический университет»,
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11)
(8412) 49-60-09

Аннотация. Создание и развитие новых технологий и производственных процессов привели к возросшей потребности измерения расхода жидкостей, протекающих в напорных и безнапорных трубопроводах. Системы сбора и обработки данных в настоящее время являются общедоступным средством

Mikheev Mikhail Yur'evich
doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of information technologies and systems,
Penza State Technological University,
(440039, 13 Gagarin street, Penza, Russia)

Gudkova Ekaterina Aleksandrovna
assistant,
sub-department of information technologies and systems,
Penza State Technological University,
(440039, 13 Gagarin street, Penza, Russia)

Lepeshev Andrey Alekseevich
senior engineer,
military representation 5021
of Ministry of Defence of the Russian Federation,
externe,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11 Baydukova travel / Gagarin street,
Penza, Russia)

Abstract. Creation and development of new technologies and manufacturing processes have led to increased demand for flow measurement of liquids flowing in pressure and non pressure. Data collection and processing are now available of obtaining experimental data of a new quality that cannot be obtained by other

получения экспериментальной информации нового качества, которую невозможно получить иными средствами – это результаты обработки огромного числа измерений, полученных в цифровой форме; возможность регистрации случайно появляющихся событий с высокой разрешающей способностью по времени и амплитуде; регистрация быстрых процессов. В данной статье разработаны информационно-структурные модели системы сбора и обработки данных с кориолисова расходомера инерционного типа: структурная схема измерительного канала, обобщенная структурная схема системы сбора и обработки данных с кориолисова расходомера инерционного типа; проведено объектно ориентированное моделирование системы в виде диаграмм языка UML.

Ключевые слова: система сбора и обработки данных, UML-модели, кориолисов расходомер, моделирование.

means – is the result of processing a huge number of measurements obtained in digital form; possibility of detecting randomly occurring events with high resolution in time and amplitude; registration of fast processes. In this paper, we develop information-structural model of the system for collecting and processing data for the Coriolis flowmeter inertial type: block diagram of the measuring channel, a generalized block diagram of a system for collecting and processing data from Coriolis flowmeter inertial type; fulfilled object-oriented simulation in the form of diagrams UML.

Key words: simulation, system of data collection and processing, UML-model, the Coriolis flowmeter, modeling.

УДК 519.876.5

Михеев, М. Ю.

Информационно-структурные модели системы сбора и обработки данных с кориолисова расходомера инерционного типа / М. Ю. Михеев, Е. А. Гудкова, А. А. Лепешев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 43–50.

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ

УДК 62-503.5

К ПРОБЛЕМЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОЕКТОВ

Б. Ф. Безродный, Е. А. Михеев

Процесс реализации комплексных проектов, направленных на обеспечение гарантированного электропитания крупных промышленных и административных объектов, состоит из пяти последовательных этапов:

1) обследование объекта;
2) проектирование;
3) поставка и тестирование;
4) строительно-монтажные и пусконаладочные работы (СМР и ПНР);
5) техническое обслуживание.

Каждый из перечисленных выше этапов принимает в качестве исходных данных результаты предыдущего, а его результаты являются входными данными для последующего [1].

При этом новый проект может возникнуть либо в результате адресного обращения одного из партнеров компании либо в результате активного поиска менеджерами новых заказчиков и глубокого изучения конъюнктуры рынка. Как правило, это обращение имеет вид технического задания (ТЗ), в котором сформулированы исходные данные объекта заказчика, включающие условия эксплуатации, а также требования к источнику бесперебойного питания (ИБП) или системе гарантированного бесперебойного питания. Система бесперебойного электропитания включает в себя еще дизель-генераторную установку (ДГУ), автоматику управления системой и т.п. Но даже в этом случае необходимо, используя специальную компьютерную программу – калькулятор, подобрать необходимую батарейную емкость, которая обеспечит требуемое время автономной работы объекта заказчика при пропадании напряжения от внешнего источника электроснабжения [2]. Если в обращении содержится лишь общая информация, которой недостаточно для выбора соответствующего оборудования, организуется выезд на объект заказчика для проведения инженерного обследования и уточнения исходных данных. После проведения инженерного обследования, экспертное подразделение выдает менеджеру, сопровождающему этот проект, рекомендации по выбору соответствующего оборудования по мощности и времени автономной работы. На основе этих данных менеджер выпускает и согласует с заказчиком технико-коммерческое предложение [2, 3]. После этого выполняется проект, а также уточняется объем необходимых к выполнению работ и уточняется спецификация поставляемого оборудования и изделий. В том случае, когда необходимого оборудования в данный момент нет на складе, осуществляется его заказ у производителя. Поступившее от производителя оборудование проходит обязательную процедуру тестирования, включающую в себя настройку параметров, подключение к устройству, имитирующему нагрузку определенной мощности, проверку автономной работы нагрузки при пропадании внешней сети электроснабжения и т.п. При проведении процедуры тестирования заполняется специ-

ально разработанная форма, в которую вносятся проверяемые параметры [4]. По окончании тестирования заполняется акт, который хранится в электронном виде в базе данных, а в бумажном виде в архиве технического центра. В соответствии с условиями договора поставки оборудование, указанное в спецификации, доставляется на объект заказчика. Монтаж оборудования и электромонтажные работы не требуют высокой квалификации и выполняются либо техническими специалистами эксплуатирующей организации заказчика либо силами субподрядной монтажной организации [5, 6]. После их окончания производятся пуско-наладочные работы (ПНР) оборудования. К выполнению ПНР допускаются исключительно специалисты, прошедшие специальную подготовку и имеющие сертификат, дающий им право проведения соответствующих работ на соответствующем типе оборудования. После проведения ПНР с персоналом эксплуатирующей организации проводится инструктаж (под роспись в журнале), оборудование готово к эксплуатации. Если того требуют условия договора, в некоторых случаях проводятся приемо-сдаточные испытания. Для их проведения составляется программа, выбирается соответствующая производственная база и специальное оборудование, а также контрольно-измерительные приборы. По результатам проведения приемо-сдаточных испытаний подписываются протоколы, и оборудование передается в эксплуатацию заказчику [7].

Ниже, в табл. 1, приведены дестабилизирующие технологический процесс факторы и нейтрализующие их корректирующие и предупреждающие действия для каждого этапа технологической цикла ООО «Абитех».

Таблица 1

Дестабилизирующие технологический процесс факторы и нейтрализующие их корректирующие и предупреждающие действия для каждого этапа технологической цикла ООО «Абитех»

Факторы, дестабилизирующие технологический процесс	Корректирующие и предупреждающие действия
Обследование объекта	
Недостаточная укомплектованность штата	Привлечение специалистов высокой квалификации
Нестандартные условия эксплуатации на объекте	Оснащение приборами и измерительной аппаратурой
Труднодоступность объекта обследования	Использование специального программного обеспечения
Недостаточная квалификация штата	Обучение специалистов
Проектирование	
Недостаточные исходные данные	Использование САПР
Нечеткая постановка задачи	Подробная формализация задачи
Нормативные ограничения на использование	Использование специфических данных
Изменение требований заказчика в процессе проектирования	Привлечение специалистов высокой квалификации
Поставка и тестирование	
Несоблюдение сроков поставки	Сопровождение (мониторинг) процесса доставки
Несоблюдение условий транспортировки, разгрузки-погрузки, хранения	Использование спецтранспорта и упаковки
	Организация (аренда) специализированного склада
Недостаточные сроки тестирования	Автоматизация процесса тестирования
Несоблюдение регламента операций по тестированию	
СМР и ПНР	
Недостатки планирования	Современное логистическое обеспечение
Недостаточная укомплектованность штата	Оснащение специальными приборами и инструментами
	Привлечение специалистов высокой квалификации
Недостаточная квалификация штата	Обучение специалистов
Техническое обслуживание	
Сложности по согласованию времени проведения ТО	Постоянное наличие и пополнение ЗИП
Сложность по выводу из эксплуатации для проведения ТО	Привлечение специалистов высокой квалификации
	Оснащение специальными приборами и инструментами
Недостаточная квалификация штата	Обучение специалистов

Рассмотрим первый этап технологического цикла ООО «Абитех» – обследование объекта. Как показал анализ результатов деятельности ООО «Абитех» за последние 12 лет, вероятность успешного завершения этого этапа в штатных обычных условиях составляет в среднем $P_1 = 0{,}9$. То есть в процессе выполнения контракта дообследование объекта требуется в одном случае из десяти. В таблице приведены оценки влияния на результат этого этапа присущих ему дестабилизирующих факторов и эффективности корректирующих и предупреждающих действий системы менеджмента качества, применяемых для нейтрализации этих факторов, а также затраты на осуществление этих действий, в том числе стоимости и сроки службы оборудования, используемого для их обеспечения с целью повышения качества обследования объекта. Для ООО «Абитех», как и для КЭТЗ, удельная амортизационная стоимость оборудования рассчитывается из расчета в месяц, т.е. длительность временного дискрета в расчетах принимается равной месяцу. Также распределяются затраты на обновление программного обеспечения, поверку контрольно-измерительного оборудования, пополнения ЗИП и обучение специалистов. Аналогично КЭТЗ затраты на оплату специалистов также исчисляются в месяц.

Проектирование системы гарантированного электропитания объекта по заданию заказчика составляет второй этап технологического цикла ООО «Абитех». Практика показывает, что для большинства контрактов перепроектирование осуществляется где-то в одном случае из 20. Поэтому вероятность успешного завершения этапа проектирования без воздействия дестабилизирующих факторов можно принять $P_2 = 0{,}95$. Более высокий показатель, чем у предыдущего этапа, обусловлен в первую очередь тем, что в ООО «Абитех» создано специальное подразделение проектировщиков. В таблице приведены оценки влияния на результат этапа проектирования присущих ему дестабилизирующих факторов и эффективности корректирующих и предупреждающих действий системы менеджмента качества, применяемых для нейтрализации этих факторов, а также затраты на осуществление этих действий, в том числе стоимости и сроки обновления САПР, используемых для проектирования системы гарантированного электропитания объекта по заданию заказчика и обеспечивающих повышение качества проекта.

Третьим этапом технологического цикла ООО «Абитех» являются поставка и тестирование оборудования, предусмотренного спецификацией разработанного на предыдущем этапе технологического цикла проекта системы гарантированного электропитания конкретного объекта. На этом этапе действует достаточно широкий спектр дестабилизирующих факторов, что определяет разнородность набора корректирующих и предупреждающих действий системы менеджмента качества, применяемых для нейтрализации этих факторов.

В таблице так же, как и для первых двух этапов, приведены данные о размерах снижения вероятности успешного завершения этого этапа из-за действия упомянутых в таблице дестабилизирующих факторов, а также проценты снижения этого влияния с помощью корректирующих и предупреждающих действий. В этой же таблице содержатся данные о стоимостных характеристиках, применяемых на этапе поставки и тестирования оборудования для оснащения системы гарантированного электропитания объекта, включая затраты на автоматизацию тестирования, а также современные складские операции.

Поставка и тестирование оборудования для оснащения системы гарантированного электропитания объекта являются наиболее отработанным и освоенным этапом технологического цикла ООО «Абитех». Поэтому с учетом высокого качества производства предприятий-поставщиков на практике для большинства контрактов дополнительные усилия на этом этапе не требуются. Поэтому вероятность успешного завершения этого этапа можно принять $P_3 = 0{,}98$.

Суть четвертого этапа технологического цикла ООО «Абитех» заключается в проведении строительно-монтажных и пуско-наладочных работ по монтажу и пуску в действие системы гарантированного электропитания объекта. Этот этап составляет основную долю хлопот руководству ООО «Абитех», поскольку именно на нем, несмотря на относительно слабое влияние дестабилизирующих факторов и приличную эффективность применяемых корректирующих и предупреждающих действий (см. таблицу), штатная вероятность успешного завершения этапа строительно-монтажных и пуско-наладочных работ по экспертным оценкам не превышает $P_4 = 0{,}8$, т.е. каждая пятая приемочная комиссия отыскивает недостатки в смонтированной системе гарантированного электропитания объекта, которые имеют самые разнообразные причины, но тем не менее требуют устранения.

Таблица 2

Оценки влияния на результат технического обслуживания присущих ему дестабилизирующих факторов

Дестабилизирующий фактор	% влияния	Корректирующее действие	% снижения	Приборы	Стоимость прибора, руб.	Кол-во, шт.	Срок эксп-ции, лет	Затраты, руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Обследование объекта								
Недостаточная укомплектованность штата	20 %	Привлечение специалистов высокой квалификации	30 %					30000 × 3 = 90000
Нестандартные условия эксплуатации на объекте	15 %	Оснащение приборами и измерительной аппаратурой	40 %	ТепловизорTESTO 875-1	83 898,31	4	5	Поверка в ФБУ РОСТЕСТ-МОСКВА 23 000
				ОсцилографFLUKE 125/S	55 045?05	1	10	
				Прибор для измерения показателей качества электроэнергии ПРОРЫВ-1	66 949,15	4	5	
				Регистратор качества электроэнергии FLUKE 1760TR	595 423,73	2	5	
Труднодоступность объекта обследования	25 %	Использование специального программного обеспечения	20 %	PSPICE	350 000		1	Обновление 50 000
Недостаточная квалификация штата	30 %	Обучение специалистов	40 %					20 000 × 4 = 80 000
Проектирование								
Недостаточные исходные данные	15 %	Использование САПР	40 %	Microsoft Office Visio Pro; AutoCAD	25 000; 150 000		1	Обновление 30 000
Нечеткая постановка задачи	25 %	Подробная формализация задачи	20 %					40 000 × 2 = 80 000
Нормативные ограничения на использование	10 %	Использование специфических данных	15 %	Дополнительная специальная литература				Договор: 60 000
Изменение требований заказчика в процессе проектирования	30 %	Привлечение специалистов высокой квалификации	30 %	Новый проект				40 000 × 3 = 120 000
Поставка и тестирование								
Несоблюдение сроков поставки	40 %	Сопровождение (мониторинг) процесса доставки	30 %	Организация дополнительного рабочего места	60 000	1		30 000 × 1 = 30 000
Несоблюдение условий транспортировки, разгрузки-погрузки, хранения	20 %	Использование спецтранспорта и упаковки	15 %		60 000			
		Организация (аренда) специализированного склада	20 %		300 000			

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Недостаточные сроки тестирования	30 %	Автоматизация процесса тестирования	30 %	Стенд для тестирования ИБП	45 000	1		Поверка в ФБУ РОСТЕСТ-МОСКВА 31 000
				Латр TSGC2-30	45 000	1		
				Реостат испытательная нагрузка 45 кВа	30 000	1		
				Осциллограф Fluke 125/S ScopeMeter 125	55 000	1		
				Ноутбук LenovoThinkPad X230 12.5»	25 000	1		
				Токоизмерительные клещи Fluke 355	20 000	1		
				Мультиметр APPA 305 USB	8000	1		
				Стеллаж для батарей OpenRack ORH-3	25 000	1		
				АКБ UPS 12-400MRX (PRC)	500 000	80		
				Гидравлическая тележка HLT 10	19 000	1		
				Программатор V5.7T	7500	1		
				Паяльник с электронным регулятором температуры	3000	1		
				Пистолет термоклеевой STEINEL GLUEMATIC 5000	2500	1		
				Шуруповерт АКК 6271DWPE	1500	1		
				Комплект изолированного инструмента	60 000	2		
Несоблюдение регламента операций по тестированию	30 %	Автоматизация процесса тестирования	40 %	См. выше	1 472 500			24 909,80
СМР и ПНР								
Недостатки планирования	25 %	Современное логистическое обеспечение	20 %	Программа логистического планирования	150 000			40 000 × 2 = 80 000
Недостаточная укомплектованность штата	20 %	Оснащение специальными приборами и инструментами	20 %	См. «Обследование объекта»				23 000
		Привлечение специалистов высокой квалификации	15 %					40 000 × 3 = 120 000
Недостаточная квалификация штата	25 %	Обучение специалистов	35 %					20 000 × 4 = 80 000
Техническое обслуживание								
Сложности по согласованию времени проведения ТО	30 %	Постоянное наличие и пополнение ЗИП	25 %	См. Перечень ЗИП				886 030
Сложность по выводу из эксплуатации для проведения ТО	15 %	Привлечение специалистов высокой квалификации	15 %					40 000 × 3 = 120 000
		Оснащение специальными приборами и инструментами	25 %	См. «Обследование объекта»				23 000
		Оперативное резервирование	30 %	Резервный комплект оборудования	600 000			
Недостаточная квалификация штата	25 %	Обучение специалистов	20 %					20 000 × 4 = 80 000

Перейдем к последнему этапу технологического цикла ООО «Абитех» – техническому обслуживанию. Заказчики, как правило, прибегают к услугам ООО «Абитех» для осуществления технического обслуживания оборудования системы гарантированного электропитания объекта, поскольку оно является достаточно сложным, наукоемким и требует высокой квалификации и специального обучения специалистов, осуществляющих на нем как профилактические, так и ремонтные работы. В таблице приведены оценки влияния на результат этого этапа присущих ему дестабилизирующих факторов и эффективности корректирующих и предупреждающих действий системы менеджмента качества, применяемых для нейтрализации этих факторов, а также затраты на осуществление этих действий, в том числе стоимости и сроки службы специальных приборов и инструмента, а также ЗИПа, используемых для проведения технического обслуживания оборудования системы гарантированного электропитания объекта.

Артикул	Перечень ЗИП	Цена EUR
1014488	Fuseholder 14x51	82,39
1001392	Current Transformer 100/2A	104,86
1006888	Capacitor 100uF 300Vrms	92,38
1012999	Contactor AC_60A/230V_50/60Hz_3P + Aux	202,23
1001104	Fuse 40A_500VAC	4,99
1014488	Fuseholder 14x51	82,39
1007160	Capacitor 200uF 300VAC	89,88
1012999	Contactor AC_60A/230V_50/60Hz_3P + Aux	202,23
1001104	Fuse 40A_500VAC	4,99
1014488	Fuseholder 14x51	82,39
1001392	Current Transformer 100/2A	104,86
1007160	Capacitor 200uF 300VAC	89,88
1012999	Contactor AC_60A/230V_50/60Hz_3P + Aux	202,23
1001730	Fuse 50A_690VAC	47,44
1014488	Fuseholder 14x51	82,39

При этом, если заказчик системы гарантированного электропитания выполняет все условия эксплуатации оборудования, своевременно заключает и пролонгирует договора на техническое обслуживание, а также обеспечивает своевременный оперативный доступ персонала ООО «Абитех» в помещения, где установлены системы гарантированного электропитания объекта, то вероятность успешного завершения этапа технического обслуживания без воздействия дестабилизирующих факторов остается на уровне $P_2 = 0{,}95$.

Вывод

Проведенная с использованием разработанных в [1–3] методов и процедур оптимизация построения и порядка функционирования системы менеджмента ООО «АБИТЕХ» позволила в целом на 15–17 % снизить в конечном итоге количество предъявляемых заказчиками рекламаций и на 13–15 % сократить число проектных ошибок и обоснованных претензий по качеству сервисного обслуживания. Одновременно объем собственных рекламаций ООО «АБИТЕХ», предъявленных поставщикам оборудования и комплектующих элементов и материалов на основе несоответствий, выявленных в результате входного контроля поставляемого оборудования, его испытаний и тестирования, а также приемо-сдаточных испытаний и анализа отказов систем гарантированного электропитания на оборудуемых объектах, возрос на 9–11 %. При этом данный эффект был достигнут без увеличения сметы затрат на действующую систему менеджмента качества предприятия.

Список литературы

1. Михеев, Е. А. Метод оптимизации порядка применения различных стратегий менеджмента качества на основе максимизации вероятности бездефектного завершения процесса производства продукции / Е. А. Михеев // Известия Института инженерной физики. – 2009. – № 1 (11). – С. 24–29.
2. Михеев, Е. А. Оценка эффективности процесса внедрения системы менеджмента качества на основе его вероятностно-игровой модели / Е. А. Михеев // Известия Института инженерной физики. – 2008. – № 3 (9). – С. 21–25.

3. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2012. – Т. 1. – С. 340.
4. Михеев, Е. А. Оптимальный выбор стратегии менеджмента качества производственного процесса / Б. Ф. Безродный, Е. А. Михеев // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС : межвуз. сб. науч. трудов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – Вып. 14. – С. 233–246.
5. Обзор современных симплексных ретрансляторов радиосигналов / Ю. А. Сивагина, И. Д. Граб, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2012. – Т. 1. – С. 74–76.
6. Лысенко, А. В. Способ снижения величины вибрационных нагрузок в несущих конструкциях ЭС и методика, его реализующая / А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 41–44.
7. Михеев, Е. А. Анализ недостатков методологии построения и внедрения систем менеджмента качества на отечественных производственных предприятий / Е. А. Михеев // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 2. – С. 230–232.

Безродный Борис Федорович
доктор технических наук, профессор,
главный инженер,
Проектно-конструкторско-технологическое бюро железнодорожной автоматики и телемеханики
(105082, Россия, г. Москва,
Переведеновский пер., 21/9)
(849-9)260-01-19
E-mail: boris.bezrodny@yandex.ru

Bezrodnyy Boris Fedorovich
doctor of technical sciences, professor,
chief engineer,
Design-technological bureau of railway automation and remote control
(105082, 21/9 Perevedenovskiy lane, Moscow, Russia)

Михеев Евгений Александрович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Межрегиональное общественное учреждение
«Институт инженерной физики»
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,
Б. Ударный пер., 1 «А»)
(4967) 35-31-93
E-mail: info@iifrf.ru

Mikheev Evgeniy Aleksandrovich
candidate of technical sciences, senior stuff scientist,
Inter-regional public institution
«Institute of engineering physics»
(142210, 1 «A» B. Udarniy lane, Serpukhov city, Moscow region, Russia)

Аннотация. Представлен процесс реализации комплексных проектов, направленных на обеспечение гарантированного электропитания крупных промышленных, как совокупность некоторых этапов, реализация которых позволит после проведения приемо-сдаточных испытаний передать оборудование в эксплуатацию заказчику. Дан анализ технологического цикла на примере предприятия ООО «Абитех».

Ключевые слова: электропитание, техническое обслуживание, оборудование, пуско-наладочные работы, дестабилизирующие факторы.

Abstract. Provides a process for implementation of comprehensive projects aimed at ensuring power supply industrial as a collection of parts, which allows after the acceptance tests pass the equipment into service to the customer. An analysis of the technological cycle for example enterprise LLC «Abiteh».

Key words: power supply, maintenance, equipment, commissioning, destabilizing factors.

УДК 62-503.5
Безродный, Б. Ф.
К проблеме оптимизации процесса менеджмента качества реализации комплексных проектов / Б. Ф. Безродный, Е. А. Михеев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 51–57.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 681.321

АВТОМАТИЗАЦИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА В СРЕДЕ MATLAB

В. В. Маркелов, А. И. Власов, Д. Е. Зотьева

Введение

Контроль качества изделий электронной техники является неотъемлемой процедурой жизненного цикла [1]. В работе [2] были рассмотрены особенности применения пакета MATLAB для анализа качества изделий электронной техники, даны рекомендации по формированию исходных данных анализа и их обработке.

В общем случае различают следующие виды статистического контроля партии продукции по альтернативному признаку [3–6]:

– одноступенчатый контроль – статистический контроль, характеризующийся тем, что решение относительно приемки партии продукции принимают по результатам контроля только одной выборки;

– двухступенчатый контроль – статистический контроль, характеризующийся тем, что решение относительно приемки партии продукции принимают по результатам контроля не более двух выборок, причем необходимость отбора второй выборки зависит от результатов контроля первой выборки;

– многоступенчатый контроль – статистический контроль, характеризующийся тем, что решение относительно приемки партии продукции принимают по результатам контроля нескольких выборок, максимальное число которых установлено заранее, причем необходимость отбора последующей выборки зависит от результатов контроля предыдущих выборок;

– последовательный контроль – статистический контроль, характеризующийся тем, что решение относительно приемки партии продукции принимают по результатам контроля нескольких выборок, максимальное число которых не установлено заранее, причем необходимость выборки зависит от результатов контроля предыдущих выборок.

Вопросы автоматизации анализа в среде MATLAB методов многоступенчатого контроля рассмотрены в данной статье.

1. Методика автоматизации многоступенчатого контроля в среде MATLAB

Многоступенчатый контроль является логическим продолжением двухступенчатого [3–5]. Первоначально берется выборка объемом n_1 и определяется число дефектных изделий m_1. Если $m_1 \le c_1$, то партия принимается. Если $c_1 < m_1 < d_1$ $(d_1 > c_1 + 1)$, то партия бракуется. Если $c_1 < m_1 < d_1$, то принимается решение о взятии второй выборки объемом n_2. Пусть среди $n_1 + n_2$

изделий имеется m_2 дефектных. Тогда если $m_2 < c_2$, где c_2 – второе приемочное число, то партия принимается; если $m_2 \geq d_2$ $(d_2 > c_2 + 1)$, то партия бракуется. При $c_2 < m_2 < d_2$ принимается решение о взятии третьей выборки (рис. 1).

```
n=[30 50 90 120 135 160 195 210 220 260];
m=[7 10 18 23 26 31 36 40 41 45];
for i=1:9
    if m(i)<=c(i)
     disp ('партия принимается');
     break;
    else
        if m(i)>=d(i)
         disp('партия бракуется');
         break;
        end;
    end;
    if i=9
     if m(10)<c(10)
         disp ('партия принимается');
     else
         disp('партия бракуется');
end;
```

```
партия принимается
>>
```

Рис. 1. Листинг алгоритма многоступенчатого контроля в MATLAB

В дальнейшем контроль производится по аналогичной схеме, за исключением последнего k-го шага. На k-м шаге, если среди $\sum_{i=1}^{k} n_j$; проконтролированных изделий выборки оказалось m_k дефектных и $m_k \leq c_k$, то партия принимается; если же $m_k > c_k$, то партия бракуется. В многоступенчатых планах число шагов k заранее задается. Обычно принимается, что $n_1 = n_2 = \ldots n_k$.

2. Факторы, учитываемые при формировании плана контроля

Проанализируем факторы, которые должны приниматься во внимание при выборе плана контроля [7–11].

Практическая осуществимость плана отбора. Самыми простыми для осуществления являются планы одноступенчатого контроля, а наиболее сложными – планы многоступенчатого контроля. Для выполнения последних требуется более квалифицированный персонал, и, кроме того, проверка полученных результатов является при этих планах более сложной.

Информация о качестве партии. При определении среднего качества за длительный период времени информация о качестве партии лучше всего обеспечивается планами одноступенчатого контроля, так как этими планами предусматриваются большие объемы выборок. Это связано с тем, что при исчислении и учете показателей среднего качества партий учитываются результаты только первой выборки.

Доступность извлечения выборки. В тех случаях, когда извлечение дополнительных выборок затруднено из-за перемещения партии или по каким-либо другим причинам, самым удобным методом может оказаться однократная выборка.

Колебания объема выборок. При применении планов двухступенчатого и многоступенчатого контроля должна быть обеспечена возможность извлечения выборок, отличающихся по сво-

ему объему. Если такая возможность отсутствует, то в таких случаях может применяться только однократная выборка.

Влияние величины предельных допустимых отклонений от приемлемого уровня качества. Значительные по своей величине предельные допустимые отклонения от приемлемого уровня качества снижают экономичность применения многоступенчатого контроля. Кривые, изображенные на рис. 2, дают представление о среднем объеме выборок для трех типов планов контроля при приемлемом уровне качества, равном приблизительно 1,5. Графики двукратной и многократной выборки показывают, что среднее число контролируемых изделий достигает максимума при предельном допустимом отклонении качества от приемлемого уровня.

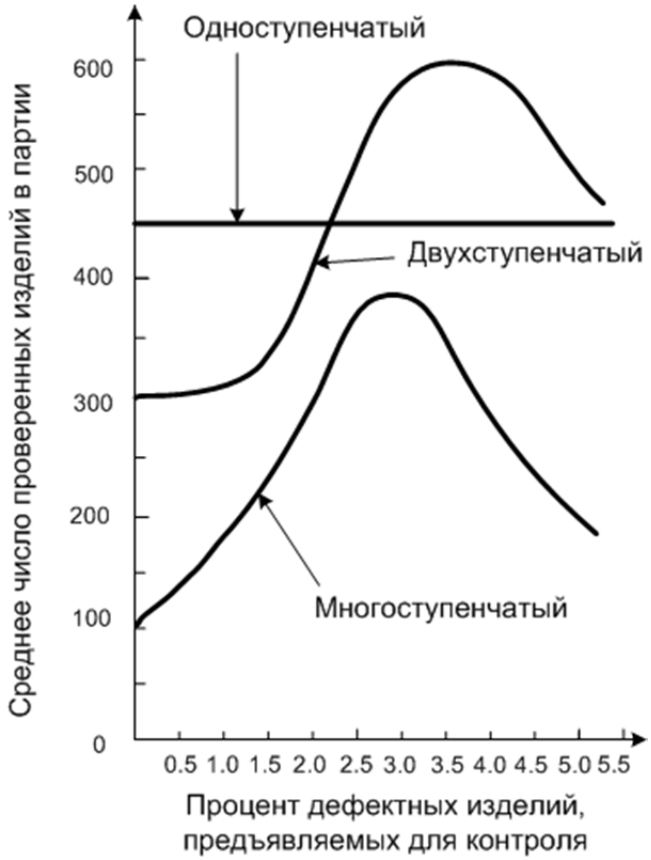


Рис. 2. Сравнение средних чисел проверяемых изделий
при одноступенчатом, двухступенчатом и многоступенчатом выборочном контроле

Планы с приемочным числом, равным нулю. Такие планы контроля не допускают ни двукратной, ни многократной выборки; поэтому всегда предусматривают только однократную выборку.

Значения приемлемого уровня качества выше 15. В этом случае применяются только планы одноступенчатого контроля.

Стоимость проверки одного изделия. При высокой стоимости контроля экономия от применения двукратной или многократной выборки может быть настолько высокой, что применение однократной выборки окажется совершенно нецелесообразным. И наоборот, при низкой стоимости контроля экономия, достигаемая при уменьшении объема выборок, может оказаться недостаточной даже для компенсации затрат, связанных с усложнением проведения контроля.

Факторы психологического характера. На первый взгляд может показаться, что планы двухступенчатого и многоступенчатого контроля увеличивают шансы поставщика, который как будто бы получает право на «вторую попытку». На самом же деле кривые оперативных характеристик во всех случаях остаются практически одинаковыми [11, 12]. Это означает, что степень застрахованности поставщика от угрозы отклонения партии не зависит от типа контроля.

3. Анализ результатов многоступенчатого контроля

Планы контроля, основанные на многократной выборке, требуют наименьшего среднего объема выборки. Экономия на объеме выборки, получаемая при двукратной и многократной выборке, оказывается наибольшей в тех случаях, когда контролю подвергаются партии очень высокого или очень низкого качества.

В ходе выполнения многоступенчатого контроля решение принимается по результатам последовательного контроля нескольких заранее установленных выборок продукции. Необходимость отбора каждой последующей выборки принимается по результатам контроля предыдущей.

Такой план контроля наиболее целесообразно применять при ограниченном времени на отбор выборок. Многоступенчатый контроль приводит к увеличению стоимости испытания и предъявляет высокие требования к рабочим [13, 14].

Заключение

Вопросы автоматизации анализа в среде MATLAB по последовательному контролю будут рассмотрены в следующих работах.

Практическая ценность предложенных инструментов состоит в том, что они позволяют сделать правильный выбор необходимых методов в зависимости от решаемых задач на предприятии и необходимого набора функций требуемой системы.

Разработанная автоматизированная система анализа результатов входного контроля может быть использована на малых и средних предприятиях в качестве инструмента для визуализации результатов входного контроля и в качестве инструмента для принятия управленческих решений на основе полученных данных. Так же разработанная система может быть использована в качестве прототипа для более сложной системы контроля и управления качеством.

Список литературы

1. Маркелов, В. В. Управление качеством электронных средств : учеб. пособие / В. В. Маркелов, А. С. Кабаева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 272 с. – (Библиотека «КЭВС» : в 25 кн.; кн. 2).
2. Маркелов, В. В. Автоматизация методов входного статистического контроля при управлении качеством изделий электронной техники в среде MATHLAB / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Д. Е. Зотьева // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3. – С. 38–44.
3. Хэнсен, Б. Л. Контроль качества. Теория и применение : пер. с англ. / Б. Л. Хэнсен. – М. : Прогресс, 1968. – 269 с.
4. Статистические методы контроля качества продукции : пер. с англ. / Л. Ноулер и др. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 96 с.
5. Управление качеством электронных средств : учеб. для вузов / О. П. Глудкин и др. – М. : Высшая школа, 1999. – 414 с.
6. Глудкин, О. П. Всеобщее управление качеством : учеб. для вузов / О. П. Глудкин. – М. : Радио и связь, 1999. – 454 с.
7. 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. – С. 35–43.
8. Маркелов, В. В. Управление и контроль качества изделий электронной техники. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Д. Е. Зотьева // Датчики и системы. – 2014. – № 8. – С. 55–67.
9. Власов, А. И. Визуальные модели управления качеством на предприятиях электроники / А. И. Власов, А. М. Иванов // Наука и образование. – 2011. – № 11. – С. 34.
10. Современные методы и средства обеспечения качества в условиях комплексной автоматизации / В. Г. Дудко, К. Д. Верейнов, А. И. Власов, А. Г. Тимошкин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. АСУПР. – 1996. – № 2. – С. 54–72.
11. Еланцев, А. В. Автоматизированный контроль и испытания электронной аппаратуры / А. В. Еланцев, В. В. Маркелов. – М. : Изд-во МГТУ, 1990. – 51 с.
12. Власов, А. И. Системный анализ технологических процессов производства сложных технических систем с использованием визуальных моделей / А. И. Власов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 10, ч. 2. – С. 17–26.
13. Адамова, А. А. Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств / А. А. Адамова, А. П. Адамов, Г. Х. Ирзаев. – СПб. : Политехника, 2008. – 264 с.
14. Гриднев, В. Н. Проектирование коммутационных структур электронных средств : учеб. пособие / В. Н. Гриднев, Г. Н. Гриднева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – Кн. 7. – 344 с.

Маркелов Виктор Васильевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
8-(499)-263-62-26
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

Власов Андрей Игоревич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
8-(499)-263-62-26
E-mail: vlasov@iu4.ru

Зотьева Дарья Евгеньевна
студентка,
кафедра проектирования и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана,
(105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
8-(499)-263-65-53
E-mail: maxaonk@ya.ru

Аннотация. Проанализированы возможности автоматизации методов входного статистического контроля при управлении качеством изделий электронной техники в среде MATLAB. Данная работа посвящена исследованию методов статистического контроля по альтернативному признаку. Исследованы методы многоступенчатого контроля. Представлены инструменты в среде MATLAB для обработки результатов статистического контроля.

Ключевые слова: многоступенчатый контроль, управление качеством, электронная аппаратура, MATLAB.

Markelov Viktor Vasil'evich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of engineering and manufacturing technology of radio-electronic equipment,
Moscow state technical university
named after N. A. Bauman
(105005, page 1, 5, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Vlasov Andrey Igorevich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of engineering and manufacturing technology of radio-electronic equipment,
Moscow state technical university
named after N. A. Bauman
(105005, page 1, 5, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Zot'eva Dar'ya Evgen'evna
student,
sub-department of engineering and manufacturing technology of radio-electronic equipment,
Moscow state technical university
named after N. A. Bauman,
(105005, page 1, 5, 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Abstract. The paper analyzes the possibility to automate the input of statistical control in the management of quality electronic products in the environment MATLAB. This paper investigates the methods of statistical control by attributes. Investigated methods of multistage control. Presents the tools in MATLAB for processing the results of statistical control.

Key words: multi-stage control, quality management, electronic equipment, MATLAB.

УДК 681.321
Маркелов, В. В.
Автоматизация многоступенчатого контроля качества в среде MATLAB / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Д. Е. Зотьева // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 58–62.

УДК 519.713

МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

А. В. Полтавский, Н. К. Юрков

Введение

Важной характеристикой информационно-измерительной техники, влияющей на эффективность ее применения по функциональному назначению, является уровень надежности, и прежде всего метрологической, отражающей способность средств измерений сохранять во времени требуемую точность. Уровень надежности объектов информационно-измерительной техники зависит от правильности планирования операций контроля, испытаний и качества работ по их эксплуатации.

Существующая теория надежности и методика определения так называемых λ-характеристик надежности базируются на модели предположения о приблизительном постоянстве интенсивности отказов (по истечении периода начальной приработки) применительно к отказам электронных устройств. Однако практика эксплуатации средств контроля (СК) [1] показывает, что интенсивность их отказов не может быть принята постоянной, так как на протяжении эксплуатации она меняется несколько раз и может носить как ускоряющийся, так и замедляющийся характер изменения во времени. Это позволяет сделать вывод о том, что теория надежности СК не может строиться лишь на привычных основах теории надежности электронных устройств и приборов, допускающих постоянство λ-характеристик. Одним из множества предлагаемых подходов может служить описание характера изменения интенсивности отказов средств контроля с помощью модели в виде экспоненциальной функции [1] .

В статье рассматривается одна из возможностей применения экспоненциальной математической модели для описания процесса изменения интенсивности отказов средств контроля подвижных объектов во время их эксплуатации на примере автоматизированных средств контроля беспилотных летательных аппаратов (АСК БЛА). Получены зависимости для определения моментов наступления отказов или сроков выполнения ремонтов, а также межремонтных интервалов времени во время эксплуатации АСК БЛА.

Постановка задачи. При эксплуатации средств контроля авиационной техники наблюдаются как метрологические, так и не метрологические отказы или, другими словами, неявные и явные отказы. Под метрологическим (неявным) отказом понимается превышение текущего значения погрешности в любой точке диапазона измерений СК нормированного для него предела. Такие отказы могут быть установлены только путем проведения проверки СК по образцовым средствам измерений или с помощью средств самоконтроля в автоматизированных СК БЛА.

Интенсивности появления как метрологических $\omega_м$, так и не метрологических отказов $\omega_{нм}$ главным образом зависят от процесса старения СК и должны рассматриваться как функции времени $\omega_м(t)$ и $\omega_{нм}(t)$, так как обе они изменяются в процессе старения СК. Общая интенсивность отказов при их независимости является суммой $\omega_м(t)$ и $\omega_{нм}(t)$, т.е.

$$\omega_z(t) = \omega_м(t) + \omega_{нм}(t).$$

В среднем соотношение интенсивностей метрологических и не метрологических отказов, как показали исследования, приведенные в [1], может быть представлено функцией, изображенной на рис. 1.

Исходя из этого интенсивность $\omega_{нм}$ не метрологических отказов рассматриваться не будет и под обозначением $\omega(t)$ будет пониматься лишь интенсивность метрологических отказов [2, 3]. Для анализа динамики отказов АСК БЛА рассмотрим статистические данные по отказам для изделий АСК – ЗУ [4]. В табл. 1 приведены данные измерений по количеству отказов АСК – ЗУ наблюдаемые в течение 8 лет с n-го по $(n + 7)$ – й год.

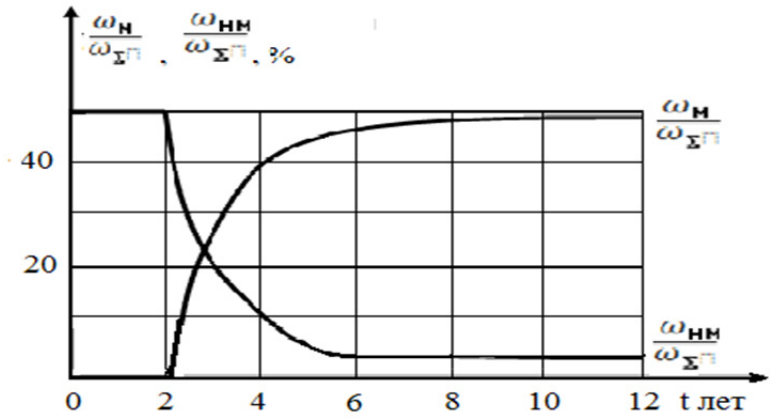


Рис. 1

Таблица 1

Год эксплуатации	n	$n+1$	$n+2$	$n+3$	$n+4$	$n+5$	$n+6$	$n+7$
Количество отказов	14	12	10	26	7	13	5	9

Полученные данные в табл. 1 свидетельствуют о том, что интенсивность отказов $\omega(t)$ не остается постоянной величиной, а изменяется с возрастом (старением) АСК. Для иллюстрации случайного разброса данная зависимость представлена на рис. 2 в виде отрезков прямых, соединяющих соответствующие расчетные точки на графике.

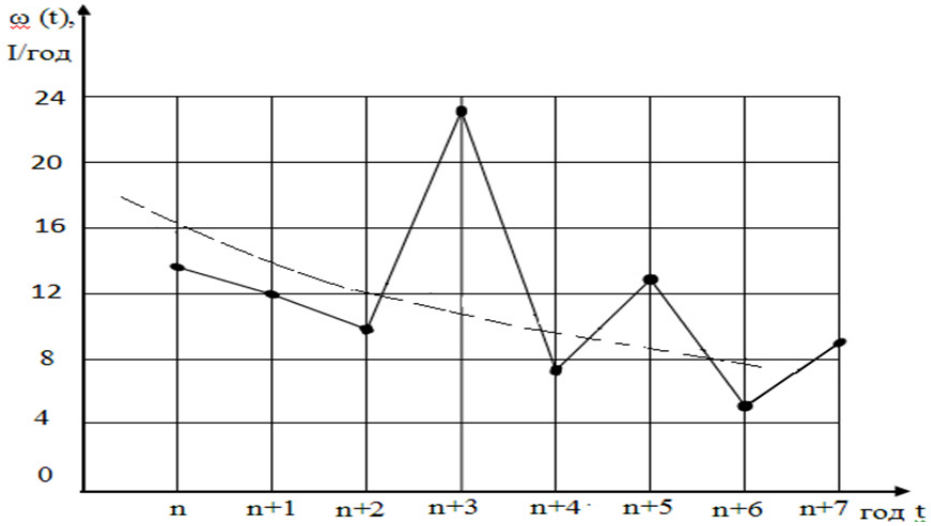


Рис. 2

Полученная ломаная линия может быть усреднена некоторой плавной кривой, нанесенной на рис. 2 штриховой линией. Это дает основание предположить, что зависимость интенсивности отказов $\omega(t)$ от срока службы АСК может быть аппроксимирована монотонной функцией. Для описания такой функции может быть использована экспоненциальная зависимость вида [5, 6]

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-\alpha t}, \tag{1}$$

где постоянные ω_0 (интенсивность отказов на момент изготовления средств АСК или начало наблюдений – $t = 0$) и α (ускорение процесса старения АСК) могут быть определены по экспериментальным данным известными методами для аппроксимации функций, например путем регрессионного анализа. Приведенная аналитическая зависимость позволяет получить модельный ряд математических соотношений, которые могут быть использованы для решения практических за-

дач, связанных с обслуживанием и ремонтом средств контроля информационно-измерительной техники.

Моделирование задачи контроля. Для анализа динамики отказов средств АСК БЛА воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК). Для этого прологарифмируем соотношение (1) и получим линейное уравнение вида [7–10]

$$Ln\omega(t) = Ln\omega_0 + a\,t.$$

Исходя из этого, для всех экспериментальных точек (табл. 1) вычислим значение $Ln\omega(t)$, затем с помощью метода МНК найдем коэффициенты регрессии $a_0 = Ln\omega_0$ и a по формулам как

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i \sum_{i=1}^{N} Ln\omega(t_i) - N\sum_{i=1}^{N} t_i Ln\omega(t_i)}{(\sum_{i=1}^{N} t_i)^2 - N\sum_{i=1}^{N} t_i^2};$$

$$a_0 = \exp\left[\frac{1}{N}(\sum_{i=1}^{N} Ln\omega(t_i) - a\sum_{i=1}^{N} t_i)\right].$$

Используя статистические данные, приведенные в табл. (1), получим очередное уравнение, описывающее плавную штриховую кривую на рис. 2:

$$\omega(t) = 16{,}5e^{-0{,}0952\,t}. \qquad (2)$$

Аппроксимация с помощью МНК кривой $\omega(t)$ показала, что имеет место отрицательное ускорение ($a < 0$) старения объектов АСК БЛА. Это означает, что каждый последующий межремонтный интервал будет длиннее предыдущего, а последний будет длиться до бесконечности. В этом случае интенсивность метрологических отказов будет убывать асимптотически с течением времени вплоть до $\omega = 0$, т.е. до прекращения дальнейших отказов.

Число отказов (ремонтов) средств АСК БЛА определим по формуле

$$h(t) = \int_0^T \omega(\tau)d\tau. \qquad (3)$$

Располагая для $\omega(t)$ выражением (1) и подставляя в (3), получим выражение

$$h(t) = \int_0^T \omega_0 e^{a\tau}d\tau = \frac{\omega_0}{a}(e^{a\,t} - 1). \qquad (4)$$

Согласно выражению (4) при $a < 0$ число ремонтов АСК при $t \to 0$ ограничено значением

$$h(t) = \lim_{t\to\infty}\frac{\omega_0}{a}(e^{a\,t} - 1) = -\frac{\omega_0}{a}. \qquad (5)$$

Из выражения (4) можно определить момент наступления для k-го ремонта

$$t_k = \frac{1}{a}Ln(\frac{a_k}{\omega_0} + 1). \qquad (6)$$

В результате для изделия АСК-3У, характеристики отказов которого приведены в табл. 1, на основании выражения (5) определено полное число ремонтов АСК за весь период службы: $n = 173$, с помощью формулы (6) получены моменты наступления сроков выполнения ремонтов:

– 1- го ремонта – $t_1 = 24{,}1$ дней (часов наработки АСК БЛА);
– 2-го ремонта – $t_{10} = 235{,}2$ дней (часов наработки АСК БЛА);
– 50-го ремонта – $t_{50} = 1062{,}8$ дней (часов наработки АСК БЛА);
– 100-го ремонта – $t_{100} = 1910{,}2$ дней (часов наработки АСК БЛА);
– 150-го ремонта – $t_{150} = 2614{,}5$ дней (часов наработки АСК БЛА).

При этом можно рассчитать длительности межремонтных интервалов по простой формуле

$$T_k = -\frac{1}{a} Ln\left(1 - \frac{1}{\frac{\omega_0}{a} + k}\right),$$

где k – порядковый номер в конце k-го межремонтного интервала.

В данном случае $T_1 = 2{,}1$ дней, $T_{10} = 2{,}23$ дней, $T_{50} = 2{,}95$ дней, $T_{100} = 4{,}94$ дней, $T_{150} = 15{,}3$ дней[1].

Заключение

Таким образом, рассмотренное и предложенное в статье использование экспоненциальной модели для своевременного выявления старения средств АСК БЛА позволяет получить формальное аналитическое описание этого процесса. Такое математическое описание дает достаточно простые аналитические зависимости для расчета скорости старения, моментов возникновения отказов, а также длительности межремонтных интервалов, практически для всех основных показателей, необходимых для обоснованной организации эксплуатации средств АСК БЛА, планирования загрузки ремонтных подразделений, размеров резервного фонда запасных частей, необходимых мероприятий по своевременному техническому обслуживанию и т.д.

Список литературы

1. Новицкий, П. В. Динамика погрешностей средств измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф, В. С. Лабунец. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.
2. Райков, Г. Исследование эксплуатационной надежности измерительных приборов корабельной энергетики : автореф. дис. … канд. техн. наук / Райков Г. – София : ВАК НРБ, 1987. – 236 с.
3. Маслов, А. Д. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры / А. Д. Маслов, В. Ю. Татарский. – М. : Сов. радио, 1972. – 264 с.
4. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
5. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М. : Наука, 1987. – 184 с.
6. Казаков, И. Е. Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И. Е. Казаков, С. В. Мальчиков. – М. : Наука, 1983. – 259 с.
7. Авакян, А. А. Создание отказоустойчивых систем электроники на основе управляющей избыточности / А. А. Авакян, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2011. – 2 т. – С. 369–375.
8. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2011. – 1 т. – С. 104–106.
9. Юрков, Н. К. Концепция синтеза сложных наукоемких изделий / Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2012. – Т. 1. – С. 3–6.
10. Analysis of the errors of active converters of passive electrical quantities / N. K. Yurkov, E. N. Kuznetsov, N. E. Kuznetsov, B. V. Tsypin // Measurement Techniques. – 2006. – V. 49, № 7. – July. – P. 703–705.

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)
8-(495)-334-84-79
E-mail: avp57avp@yandex.ru

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)

[1] Рассчитанные по приведенным формулам показатели должны рассматриваться лишь как средние прогностические величины, правильно отражающие лишь общий характер процесса, в то время как для отдельных средств АСК БЛА эти параметры могут существенно отличаться.

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

Аннотация. Метрологической уровень надежности информационно-измерительной техники, отражающей способность средств измерений сохранять во времени требуемую точность, зависит от правильности планирования операций контроля, испытаний и качества работ по их эксплуатации. В статье рассматривается возможность применения экспоненциальной зависимости изменения интенсивности отказов для разработки средств автоматизированного контроля подвижных объектов.

Ключевые слова: надежность, метрологические отказы, интенсивность, информационно-измерительная техника, контроль, модель, интенсивность отказов, автоматизированные средства контроля.

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. Metrological reliability of information-measuring technology, reflecting the ability of measuring the time required to maintain accuracy depends on the accuracy of operations planning, testing and quality control of their operation. The article considers a possibility of using an exponential link of the process of change of failure intensity for control devices of moving objects.

Key words: reliability, information and measuring equipment, metrological failures, intensity, control, model, failure rate, automated monitoring tool.

УДК 519.713
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.

УДК 519.713

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ В КОНТРОЛЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В. А. Твердохлебов

Введение

Задачи контроля и диагностирования процессов функционирования сложных систем образуют самостоятельный класс задач, при решении которых используются еще недостаточно разработанные модели процессов, требуется совмещение строгих алгоритмов и неформальных описаний свойств процессов, средства контроля и диагностирования имеют большую изоляцию их воздействий от управления системой по целевому предназначению системы. В связи с этими и другими особенностями задач контроля и диагностирования сложных систем разработка моделей и методов для решения задач является актуальной и требует поиска новых подходов, основных положений и базирующихся на них моделей и методов. В работе [1] рассматривается один из вариантов представления процесса функционирования сложной человеко-машинной системы (СЧМС) взаимосвязями и взаимодействиями процессов из следующих классов процессов: класса P_1 командно-информационных управляющих процессов, предназначенных для управления всеми процессами различной природы, которыми реализуется процесс функционирования СЧМС в ее целевом предназначении; класса P_2 процессов действий человеческих звеньев (экипажей, операторов, диспетчеров и других работников); класса P_3 процессов функционирования техники и оборудования; класса P_4 процессов энергообеспечения (электричеством, топливом и др.); класса P_5 процессов обеспечения СЧМС в соответствии с ее целевым предназначением (пассажирами, потребителями, грузами, комплектующими, спецоборудованием и т.д.); класса P_6 процессов взаимодействий с внешней средой; классов $P_7 - P_{63}$ процессов, являющиеся результатом взаимодействий процессов из базовых классов в сочетаниях по два, по три, ..., всех шести.

Контрольная и диагностическая информация в момент времени t (интервал времени Δ) определяет процессы из классов процессов P_1, P_2, ..., P_{63} значениями показателей выбранных свойств R_1, R_2, ..., R_k, сводится в таблицу $T(t)$. Последовательность таблиц $T(1)$, $T(2)$, ..., $T(c)$ является моделью конкретного процесса функционирования СЧМС. Для получения контрольной и диагностической информации о процессах в СЧМС имеются средства $\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_h$. Эти средства применяются одновременно в некотором общем интервале времени изолированно или в наборе, а также последовательно по выбранным наборам средств. В связи с этим применение набора средств получения контрольной и диагностической информации о процессах в СЧМС в момент t рассматривается как часть входного воздействия на СЧМС и как часть входного сигнала в автомат. Оставшаяся часть входного воздействия на СЧМС включает воздействие по управлению СЧМС для достижения целевого предназначения СЧМС и воздействие на СЧМС возникшего или проявившегося дефекта.

Представление процессов в СЧМС в форме автоматного отображения, преобразование символьного автоматного отображения в числовую структуру (геометрическую кривую линию с выделенными на линии точками и интерпретацией выделенных точек) позволяют строить теорию абстрактных автоматов на новой теоретической основе – на совмещенных дискретных и непрерывных числовых структурах.

1. Характеристика средств получения контрольной и диагностической информации о процессах в СЧМС

Применение средств для получения контрольной и диагностической информации о процессах в СЧМС систематизируется в простой безусловный эксперимент по распознаванию содержимого (некоторых свойств содержимого) «черного ящика» (Ч.Я.) с использованием только воздей-

ствий на содержимое через «вход» в Ч.Я. и наблюдений реакций содержимого через «выход» Ч.Я. Дополнительными условиями являются:

– содержимое Ч.Я. должно быть элементом заданного конечного семейства динамических объектов, т.е. объектов, способных воспринимать воздействия и вырабатывать реакции на воздействия;

– содержимое Ч.Я. не заменяется в процессе эксперимента;

– последовательность воздействий на содержимое Ч.Я. определяется до начала эксперимента и не изменяется в процессе эксперимента;

– эксперимент состоит из конечного числа воздействий на содержимое Ч.Я.

В случае автоматной модели СЧМС для работоспособного состояния и при наличии дефектов в СЧМС исходными данными являются:

– дискретный детерминированный автомат с конечным или счетно-бесконечным множеством состояний $A_0 = (S_0, X, Y, \delta_0, \lambda_0)$, где S_0, X и Y – множества состояний, входных и выходных сигналов, а $\delta_0 : S \times X \to S$ и $\lambda_0 : S \times X \to Y$ – функции переходов и выходов (модель работоспособной системы);

– семейство автоматов $\alpha = \{ A_i \}_{i \in I}$, где $A_i = (S_i, X, Y, \delta_i, \lambda_i)$ (семейство вариантов моделей системы с дефектами из множества дефектов $D = \{ d_i \}_{i \in I}$).

Предполагается, что пересечение множеств состояний не равных автоматов из множества автоматов $\{ A_0 \} \cup \alpha$ пусто. Содержимым Ч.Я. является точно один (неизвестный экспериментатору) автомат из множества автоматов $\{ A_0 \} \cup \alpha$. Это позволяет задачи контроля и диагностирования СЧМС решать на основе определения при эксперименте заключительного состояния исследуемого автомата. Задача определения средствами простого безусловного эксперимента заключительного состояния автомата из заданного конечного семейства автоматов решена в работе [2] на основе статьи [3].

2. Геометрические образы автоматных отображений

Сложная человеко-машинная система является динамической системой и ее простейшей моделью оказывается дискретный детерминированный автомат [4, 5]. Автоматное отображение представляет варианты процессов функционирования СЧМС [6]. Для того, чтобы расширить математический аппарат построения и анализа автоматных отображений в работах [7–10] введены и разработаны геометрические образы автоматных отображений. Автоматное отображение $f^A_{s_0}$ определяется как множество пар вида (p, q), где $p \in X^*$, $q \in Y^*$ и соответствует инициальному автомату $A_{s_0} = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$, где $s_0 \in S$ – зафиксированное начальное состояние автомата: $f^A_{s_0} = \bigcup_{p \in X^*} \{ (p, \lambda^*(s_0, p)) \}$. Для того, чтобы автоматное отображение $f^A_{s_0}$ представлять в форме графика, ограниченного начальным отрезком оси ординат, отображение $f^A_{s_0}$ заменим эквивалентным ему отображением

$$\rho^A_{s_0} = \bigcup_{p\,x \in X^* X} \{ (px, \lambda(s_p, x)) \} . \qquad (1)$$

Использование автоматного отображения $\rho^A_{s_0}$ позволяет в графике, определяющем это отображение, на оси ординат представлять $|Y|$ точек. Размещение точек для представления $\rho^A_{s_0}$ графиком в прямоугольной декартовой системе координат на плоскости элементам множества X^* на оси абсцисс предполагается размещенным в счетно-бесконечное множество точек с взаимно-

однозначным сопоставлением элементов множества X^* некоторым точкам на оси абсцисс. Для перехода от символьной формы автоматных отображений к числовым формам автоматных отображений используются взаимно-однозначные отображения φ_X и φ_Y, соответствующие нумерациям множеств X^* и Y по линейным порядкам ω_1 и ω_2, где φ_X: $X^* \to N^+$ φ_Y: $Y \to \{1, 2, \ldots, |Y|\}$.

На основе введенных понятий дадим точное определение геометрического образа автоматного отображения.

Определение 1. Геометрическим образом автоматного отображения дискретного детерминированного автомата с конечным множеством входных сигналов X, конечным множеством выходных сигналов Y и конечным или счетно-бесконечным множеством состояний будем называть тройку отображений:

– взаимно-однозначное отображение «в» вида $\phi_X : X^* \to R$, где R – множество действительных чисел;

– отображение вида $\phi : \mathrm{Pr}_2\, \phi_X \to \{1, 2, \ldots, |Y|\}$;

– взаимно-однозначное отображение вида $\phi_Y : \{1, 2, \ldots |Y|\} \to Y$.

В определении 1 взаимно-однозначные отображения ϕ_X и ϕ_Y связывают символьные и числовые структуры, а отображение ϕ переводит связи символьных объектов в связи чисел. Основные отношения между входными и выходными последовательностями оказываются определенными как связи чисел, что позволяет использовать в представлении, анализе свойств и разработке автоматных отображений мощные идеализации непрерывной числовой математике: актуальную бесконечность, непрерывность, бесконечно малую величину, предельный переход, суммирование бесконечных рядов, абстрактные пространства и т.п. Для того, чтобы использование введенного геометрического образа автоматного отображения было корректным, покажем, что, во-первых, заданные множества X, Y и отображений ϕ_X, ϕ, ϕ_Y определяют автоматное отображение, и, во-вторых, любое автоматное отображение определяется заданием множеств X, Y и отображений ϕ_X, ϕ, ϕ_Y.

Теорема 1. Для любых конечных множеств X, Y и отображений:

– взаимно-однозначного отображения $\phi_X : X^* \to R$, где R – множество действительных чисел;

– однозначного отображения $\phi : \mathrm{Pr}_2\, \phi_X \to \{1, 2, \ldots, |Y|\}$;

– взаимно-однозначного отображения $\phi_Y : \{1, 2, \ldots |Y|\} \to Y$ существует однозначно определяемое автоматное отображение.

Доказательство. Рассмотрим отображение $\psi = \phi_Y \circ (\phi \circ (\phi_X))$, построенное с использованием операции «$\circ$» умножения бинарных отношений. По определению бинарное отношение σ, удовлетворяющее условиям: 1) бинарное отношение σ является отображением; 2) $\mathrm{Pr}_1\, \sigma = X^*$; 3) для любого $p \in X^*$ $|\sigma(p)| = |p|$; 4) для любого $p \in X^*$ и префикса p' последовательности p, если $\sigma(p) = q$ и $\sigma(p') = q'$, то q' – префикс q и $|p'| = |q'|$. Покажем, что для отображения ψ условия 1 – 4 выполняются. Выполнение условий 1 и 2 очевидно по построению ψ.

Пусть $p \in X^*$ и $p = x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k}$. Представим p последовательностью префиксов x_{i_1}, $x_{i_1} x_{i_2}$, ..., $x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k}$ и, используя отображение ϕ_X, определим последовательность $\phi_X(x_{i_1})$, $\phi_X(x_{i_1} x_{i_2})$, ..., $\phi_X(x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k})$. Эта последовательность отображением ϕ и взаимно-однозначным отображением ϕ_Y преобразуется в последовательность

$$\psi(x_{i_1}),\ \psi(x_{i_1} x_{i_2}), \ldots,\ \psi(x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k}) \tag{2}$$

элементов множества Y. Длины последовательностей префиксов p и последовательности (2) совпадают, т.е. условие 3 доказано.

Выделим в p префикс p', где $p' = x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_\nu}$, $\nu < k$. На основе предшествующих построений последовательностей префиксом p' определяется последовательность $\psi\left(x_{i_1}\right)$, $\psi\left(x_{i_1} x_{i_2}\right)$, ..., $\psi\left(x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_\nu}\right)$, являющаяся префиксом длины ν последовательности (2). Выполнение условия 4 показано.

Будем представлять в геометрических образах автоматных отображений конкретные процессы функционирования автоматов с соблюдением правила: в размещении числовых образов входных последовательностей на оси абсцисс числовой образ каждой последовательности на оси абсцисс располагается правее числовых образов всех префиксов последовательности. Для соблюдения этого правила введем на множестве X^* линейный (модифицированный лексикографический) порядок.

Правило 1. На множестве X вводится некоторый линейный порядок $\omega_1\left(\prec_1\right)$

$$x_1 \prec_1 x_2 \prec_1 \ldots \prec_1 x_k .$$

Правило 2. Порядок ω_1 на X распространяется до линейного порядка на множестве X^*:

– для любых слов $p_1, p_2 \in X^*$ неодинаковой длины ($|p_1| \neq |p_2|$) $|p_1| < |p_2| \rightarrow p_1 \prec_1 p_2$;

– для любых слов $p_1, p_2 \in X^*$, для которых $|p_1| = |p_2|$ и $p_1 \neq p_2$ их отношение по порядку ω_1 повторяет отношение ближайших слева несовпадающих букв в словах p_1 и p_2.

В соответствии с правилами 1 и 2, определяющими линейный порядок ω_1 на множестве X^*, числовые образы элементов множества X^* размещаются на оси абсцисс системы координат, в которой изображается геометрический образ автоматного отображения. Для размещения числовых образов элементов множества выходных сигналов Y на оси ординат формально порядок размещения безразличен.

Теорема 2. Пусть X, Y, ϕ_X, ϕ, ϕ_Y и X, Y, ϕ_X, ϕ', ϕ_Y – два неравных геометрических образа автоматных отображений и $\phi \neq \phi'$. Тогда для любого взаимно-однозначного отображения $\phi'_Y : \{1, 2, \ldots |Y|\} \rightarrow Y$ геометрические образы X, Y, ϕ_X, ϕ, ϕ'_Y и X, Y, ϕ_X, ϕ', ϕ_Y будут неравными геометрическими образами.

Эта важная, но тривиальная по доказательству теорема, позволяет при построении геометрических образов автоматных отображений выбирать на оси ординат числовые образы элементов множества Y произвольно с сохранением неравенства геометрических образов.

3. Свойства геометрических образов автоматных отображений

Основные свойства геометрических образов автоматных отображений представлены в геометрическом образе X, Y, ϕ_X, ϕ, ϕ_Y отображением ϕ, которое имеет числовую (а не формально символьную) природу. Это позволяет основные задачи анализа законов функционирования автомата исследовать на основе анализа свойств геометрических кривых линий, на которых находятся точки, определенные отображением ϕ. Рассмотрим некоторые свойства автоматных отображений.

Автоматное отображение определено на основе свойств 1–4, определяющих бинарное отношение как автоматное отображение. На основе префиксного разложения последовательностей входных сигналов автомата определение автоматного отображения может быть сведено к проверке одного свойства бинарного отношения – быть отображением.

Определение 2. Пусть $\sigma \subset X^* \times Y^*$ – бинарное отношение, для которого выполняется условие: для любой пары $(p, q) \in \sigma$ $|p| = |q|$. Если $p = x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k}$ и $q = y_{j_1} y_{j_2} \ldots y_{j_k}$ ($k \in N^+$), то множество пар $\left\{\left(x_{i_1}, y_{j_1}\right), \left(x_{i_1} x_{i_2}, y_{j_2}\right), \ldots, \left(p, y_{j_k}\right)\right\}$ будем называть префиксным разложением пары (p, q) и обозначать $H(p, q)$.

Следующая теорема, приводимая без доказательства, дает критерий, позволяющий определять, когда бинарное отношение $\phi \subset X^* \times Y^*$ является автоматным отображением.

Теорема 3. Пусть $\sigma \subset X^* \times Y^*$ – бинарное отношение, для любой пары $(p, q) \in \sigma$ которого выполняется условие $|p| = |q|$. Бинарное отношение ϕ является автоматным отображением тогда и только тогда, когда бинарное отношение

$$\sigma' = \bigcup_{(p,q)\in\sigma} H(p,q) \tag{3}$$

является отображением.

Традиционным определением автоматного отображения $f^A_{s_0}$, связанным с функционированием инициального автомата $A_s = (S, X, Y, \delta, \lambda, s)$, является равенство $f^A_{s_0} = \bigcup_{p\in X^*} \left\{ \left(p,\ \lambda^*(s_0, p)\right) \right\}$. Преобразование этого равенства в эквивалентное определение автоматного отображения $\rho^A_{s_0} = \bigcup_{px\in X^*X} \left\{ \left(px, \lambda\left(s_p, x\right)\right) \right\}$ позволяет получить удобные средства для обозначения состояний автомата до определения эквивалентности состояний и, главное, определять автоматные отображения с использованием простейшего свойства.

Множество состояний S инициального автомата $A_{s_\varepsilon} = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_\varepsilon)$ удобно представлять в следующей форме: для любого $p \in X^*$ $\delta(s_\varepsilon, p) = s_p$ и для любых p_i, $p_j \in X^*$ выполняется равенство: $\delta\left(s_{p_i}, p_j\right) = s_{p_i p_j}$.

Теорема 4. Пусть X и Y – конечные непустые множества. Любое отображение вида $\varphi : X^* \to Y$ при $\mathrm{Pr}_1\, \phi = X^*$ взаимно-однозначно соответствует автоматному отображению $\varphi^* : X^* \to Y^*$.

Доказательство. Теорема фактически дает очень простое средство для представления автоматных отображений, т.е. любому, произвольно определенному отображению вида $\varphi : X^* \to Y$ соответствует автоматное отображение вида $\varphi^* : X^* \to Y^*$. В этом сущность теоремы. Теорема имеет простое доказательство, которое упрощается, если предполагать, что отображение вида φ^* $X^* \to Y^*$ реализовано автоматом $\mathrm{A_s} = (S, X, Y, \delta, \lambda, s)$. В этом случае автоматному отображению φ^* принадлежат пары вида $\left(x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k}, y_{j_1} y_{j_2} \ldots y_{j_k}\right)$, которые представимы следующей последовательностью $\left(x_{i_1}, \lambda\left(s, x_{i_1}\right)\right)$, $\left(x_{i_1} x_{i_2}, \lambda\left(\delta\left(s, x_{i_1}\right), x_{i_2}\right)\right)$, ..., $\left(x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_k}, \lambda\left(\delta\left(s, x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_{k-1}}\right), x_{i_k}\right)\right)$. Эта последовательность представлена подмножеством пар, которые можно полагать содержащимися в отображении $\varphi : X^* \to Y$ при любых элементах $\lambda\left(s, x_{i_1}\right)$, $\lambda\left(\delta\left(s, x_{i_1}\right), x_{i_2}\right)$, ..., $\lambda\left(\delta\left(s, x_{i_1} x_{i_2} \ldots x_{i_{k-1}}\right), x_{i_k}\right)$.

4. Особенности контроля и диагностирования СЧМС

Практическая полезность решения задач контроля и диагностирования СЧМС зависит от достоверности результатов, которая ограничена во времени и принимаемыми условиями и предположениями. Абсолютных результатов решений задач контроля и диагностирования процессов в СЧМС не существует. Причины этого не только в существовании скрытых производственных или других дефектов. Реальная СЧМС является материальным телом, в котором реализуются физические, механические, биологические и другие процессы, а также взаимосвязанные с ними командно-информационные процессы. Условия и ограничения в задачах контроля и диагностирования могут быть:

– теоретическими, базирующимися на невозможности комбинаторных вычислений большой размерности;

– теоретическими, порожденными свойствами модели системы;

– определяемыми неограниченностью множества свойств материальных объектов и реальных процессов.

Если процессы в СЧМС определены в форме алгоритма, который содержит n логических условий, то результат применения алгоритма зависит от выполнения одних и невыполнения других из этих n логических условий. Множество вариантов сочетаний логических значений условий содержит 2^n элементов, что при $n \geq 100$ исключает возможность проверки правильности алгоритма. Структура модели процесса функционирования СЧМС может быть состоящей из последовательности отдельных моделей, каждая из которых определяет функционирование СЧМС на конкретном интервале времени без использования остальных моделей. В связи с этим фактически полученная в конкретный интервал времени Δ_t контрольная и диагностическая информация основывается на модели, определяющей функционирование на интервале времени Δ_t, и должна использоваться на интервале времени Δ_{t+1}, в котором функционирование должно определяться другой моделью. Контрольная и диагностическая информация, полученная на интервале времени Δ_t, оказывается недостоверной.

Поясним на примере проверки правильности функционирования простого физического элемента, моделью которого является логический элемент «конъюнкция» с m переменными, невозможность абсолютного решения задачи контроля. Проверке правильности функционирования элемента соответствует последовательное приложение 2^m наборов двоичных сигналов. Если все реакции на приложенную последовательность наборов значений переменных определяют конъюнкцию, то можно сделать логический вывод только о том, что «была приложена, во-первых, конкретная последовательность наборов входных сигналов, а, во-вторых, последовательность приложена к исследуемому элементу «в прошлом» и получены реакции элемента, соответствующие конъюнкции». Это не означает без дополнительных гипотез, что приложение другой последовательности и в другом интервале времени будет соответствовать реализации конъюнкции. Цель приведенных примеров показать, что решение задач контроля и диагностирования процессов в СЧМС может быть только относительным в границах дополнительных условий и ограничений.

Возможными источниками несоответствия результатов контроля и диагностирования процессов в СЧМС фактическому состоянию процессов являются:

– недостаточная полнота и точность моделей процессов;

– неполнота множества процессов, представленных в модели СЧМС;

– неполнота выбранного для анализа множества дефектов;

– недостаточная полнота и точность принятых условий и ограничений, при которых результаты контроля и диагностирования применяются на практике;

– ошибки в вычислениях и действиях человеческих звеньев при анализе контрольной и диагностической информации;

– неисправности технических, дефекты и ошибки в других средствах получения фактической информации о процессах в СЧМС.

Особенности в решениях задач контроля и диагностирования СЧМС с использованием автоматных моделей позволяют сделать вывод, что контрольная и диагностическая информация, полученная в момент времени t, представима в виде множества $S_z(t)$ всех тех допустимых состояний автоматов, которые определены по значениям показателей свойств процессов в момент времени t. Задачи контроля и диагностирования оказываются решенными, если для допустимых множеств состояний $S_z(t)$ выполняются некоторые условия.

5. Классификация потоков изменений состояний автоматов, определяемых средствами контроля и диагностирования

Связи состояний автомата из начала потока с состояниями из окончания потока представим бинарным отношением вида $\rho \subset S \times S$, определяемым обобщенными функциями δ и λ. Введем следующие классы потоков изменений состояний автоматов:

1. Класс a_1. $\mathrm{Pr}_1\rho = \mathrm{Pr}_2\rho \ \& \ |\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2$.

2. Класс a_2. $|\mathrm{Pr}_1\rho| = |\mathrm{Pr}_2\rho| \ \& \ |\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2 \ \& \ \mathrm{Pr}_1\rho \cap \mathrm{Pr}_2\rho = \varnothing \ \& \ \mathrm{Pr}_2\rho \not\subset \mathrm{Pr}_1\rho$.

3. Класс a_3. $|\mathrm{Pr}_1\rho| = |\mathrm{Pr}_2\rho| \ \& \ |\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2 \ \& \ \mathrm{Pr}_1\rho \cap \mathrm{Pr}_2\rho \neq \varnothing$.

4. Класс b_1. $|\mathrm{Pr}_1\rho| > |\mathrm{Pr}_2\rho|$ & $|\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2$ & $\mathrm{Pr}_2\rho \subset \mathrm{Pr}_1\rho$.

5. Класс b_2. $|\mathrm{Pr}_1\rho| > |\mathrm{Pr}_2\rho|$ & $|\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2$ & $\mathrm{Pr}_1\rho \cap \mathrm{Pr}_2\rho \neq \varnothing$ & $\mathrm{Pr}_2\rho \not\subset \mathrm{Pr}_1\rho$.

6. Класс b_3. $|\mathrm{Pr}_1\rho| > |\mathrm{Pr}_2\rho|$ & $|\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2$ & $\mathrm{Pr}_1\rho \cap \mathrm{Pr}_2\rho \neq \varnothing$.

7. Класс c_1. $|\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2$ & $|\mathrm{Pr}_2\rho| = 1$ & $\mathrm{Pr}_2\rho \subset \mathrm{Pr}_1\rho$.

8. Класс c_2. $|\mathrm{Pr}_1\rho| \geq 2$ & $|\mathrm{Pr}_2\rho| = 1$ & $\mathrm{Pr}_2\rho \not\subset \mathrm{Pr}_1\rho$.

9. Класс c_3. $|\mathrm{Pr}_1\rho| = |\mathrm{Pr}_2\rho| = 1$ ($\mathrm{Pr}_1\rho = \mathrm{Pr}_2\rho$, $\mathrm{Pr}_1\rho \neq \mathrm{Pr}_2\rho$).

Введенные девять классов потоков построены на отношении чисел элементов между множеством состояний в начале потока и множеством состояний в окончании потока. Инвертирование этих отношений определяет шесть классов $b_1^{-1}, b_2^{-1}, b_3^{-1}, c_1^{-1}, c_2^{-1}, c_3^{-1}$, которые представляют увеличение числа состояний в начале следующего потока по отношению к числу состояний в окончании предыдущего потока.

Такое увеличение возникает, когда окончание предшествующего потока относится к функционированию работоспособной системы, а начало следующего потока относится к функционированию системы с дефектом. При получении контрольной и диагностической информации различными средствами контроля и диагностирования определяется набор потоков, которые требуется представить одним потоком. Окончание потоков должно определяться пересечением всех окончаний рассматриваемых потоков (предполагается, что в окончании каждого потока из набора потоков содержится фактическое состояние системы). Если такое пересечение пусто, то должно определяться начало следующего потока как окончание одного из предшествующих потоков. Автомат, для которого функция переходов δ удовлетворяет условию $(\forall x \in X) \bigcup_{s \in S} \{\delta(s, x)\} = S$, будем называть перестановочным. Поток изменений состояний автомата с выходами будем называть наблюдаемым потоком. Имеют место следующие теоремы.

Теорема 5. Любой поток изменений состояний автомата без выходов может быть представлен последовательностью согласованных потоков, каждый из которых принадлежит точно одному из классов a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, $a_1^{-1}, a_2^{-1}, a_3^{-1}$, $b_1^{-1}, b_2^{-1}, b_3^{-1}, c_1^{-1}, c_2^{-1}, c_3^{-1}$, где $a_1^{-1} = a_1$, $a_2^{-1} = a_2$, $a_3^{-1} = a_3$, и любой поток, соответствующий решению установочной задачи (задачи контроля и диагностирования) , оканчивается потоком одного из классов c_1, c_2, c_3.

Теорема 6. Из любого потока, соответствующего решению установочной задачи, любой составляющий поток класса a_1 может быть исключен с сохранением свойства общего потока – решать установочную задачу. Для автомата, имеющего n состояний, для которого существует поток изменений состояний класса c_1 или c_2, существует поток класса c_1 или c_2, который состоит не более, чем из $n-1$ согласованных потоков классов b_1, b_2, b_3, c_1, c_2.

Теорема 7. Для перестановочного автомата с выходами могут существовать наблюдаемые потоки изменений состояний классов b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3.

Теорема 8. Для того, чтобы для конечного дискретного детерминированного автомата без выходов $A = (S, X, \delta)$ и множества S существовал поток класса c_1 или класса c_2 с началом S, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие

$$(\forall s_i, s_j \in S)(\exists p_{ij} \in X^*)\, \delta(s_i, p_{ij}) = \delta(s_j, p_{ij}). \tag{4}$$

Теорема 9. Для того, чтобы для конечного дискретного детерминированного автомата $A = (S, X, Y, \delta, \lambda)$ и множества S существовал наблюдаемый поток класса c_1 или класса c_2 с началом S, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие

$$(\forall s_i, s_j \in S)(\exists p_{ij} \in X^*)\, \delta(s_i, p_{ij}) = \delta(s_j, p_{ij}) \vee \lambda(s_i, p_{ij}) \neq \lambda(s_j, p_{ij}). \tag{5}$$

Предлагаемая классификация потоков изменений состояний построена на связях состояний системы из начала потока с состояниями системы в окончании потока. Существенным является представление изменений состояний в широком диапазоне от предположения наличия и ориента-

ции связей состояний от начала потока к его окончанию до точного определения функциями переходов и выходов автомата связей каждого состояния из начала потока с конкретным состоянием в окончании потока. Поток может наблюдаться по свойствам, признаки которых представлены выходными сигналами автомата.

Список литературы

1. Резчиков, А. Ф. Причинно-следственные модели производственных систем / А. Ф. Резчиков, В. А. Твердохлебов. – Саратов : Научная книга, 2008. – 137 с.
2. Гилл, А. Введение в теорию конечных автоматов / А. Гилл. – М. : Наука, 1966. – 206 с.
3. Мур, Э. Умозрительные эксперименты с последовательностными машинами / Э. Мур // Автоматы : сб. ст. / под ред. К. Шеннона, Дж. Маккарти. – М. : Мир, 1956. – 358 с.
4. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
5. Лысенко, А. В. Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 2. – С. 155–158.
6. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 184–187.
7. Твердохлебов, В. А. Техническое диагностирование в геометрической интерпретации задач, моделей и методов / В. А. Твердохлебов // Автоматизация проектирования дискретных систем : тез. докладов Междунар. конф. (15–17 ноября 1995 г.). – Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1995. – Т. 1. – С. 97.
8. Твердохлебов, В. А. Геометрические образы конечных детерминированных автоматов / В. А. Твердохлебов // Известия Саратовского университета. Сер. «Математика. Механика. Информатика». – 2005. – Т. 5, вып. 1. – С. 141–153.
9. Твердохлебов, В. А. Геометрические образы законов функционирования автоматов / В. А. Твердохлебов. – Саратов : Научная книга, 2008. – 183 с.
10. Твердохлебов, В. А. Представление автоматных отображений геометрическими структурами : моногр. / В. А. Твердохлебов, А. С. Епифанов. – Саратов : ООО Издательский Центр «Наука», 2013. – 204 с.

Твердохлебов Владимир Александрович
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Институт проблем точной механики и управления РАН
(440028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, 24б)
+79173282912
E-mail: tverdokhlebovva@list.ru

Tverdokhlebov Vladimir Aleksandrovich
doctor of technical sciences, professor,
senior researcher,
Institute of Precision Mechanics and Control
of Russian Academy of Sciences
(440028, 24b Rabochia street, Saratov, Russia)

Аннотация. При решении задач контроля и диагностирования процессов функционирования сложных человеко-машинных систем возникают трудности, связанные с большим объемом формируемой и рассматриваемой информации, с применением аппарата непрерывной числовой математики для представления и анализа разнородных данных (числовых, логических, символьных). В статье изложены модели и методы для построения геометрических образов автоматных отображений, определяющих процессы в системе, рассмотрены свойства геометрических образов автоматных отображений, показаны особенности контроля и диагностирования сложных систем. Кроме этого, показан вариант декомпозиции процесса в целом функционирования сложной системы на базовые и производные от них процессы в системе. На основе анализа особенностей контроля и диагностирования сложных систем сделан вывод, что при решении задач контроля и диагностирования требуется рассматривать потоки изменений состояний ав-

Abstract. In solving of control and diagnosing problems of functioning of complex man-machine systems have difficulties related to the large amount of formed and analyzed information, related to using the apparatus of continuous numerical mathematics for reporting and analysis of heterogeneous data (numeric, logical, character). The article describes the models and methods for constructing geometric images of automaton mappings defining processes in the system, considered the properties of geometric images of automaton mappings, are shown features of the control and diagnosis of complex systems. In addition, are shown embodiment of the decomposition process in general functioning of a complex system to a basic processes and derivatives thereof. Based on the analysis of the features of control and diagnosis of complex systems concluded that the solution of problems of control and diagnosing required to consider streams of automaton states changes used as a model of system. Thereby are presented the developed classification of streams of

томата, используемого как модель системы. В связи с этим приведена разработанная классификация потоков изменений состояний автоматов, являющихся моделями работоспособной системы и системы, содержащей дефекты из выбранного для анализа множества дефектов. Для обоснования основных выводов используются теоремы, доказательства в которых содержатся в работах, на которые указаны ссылки.

Ключевые слова: система, автомат, контроль, диагностирование, эксперимент, автоматное отображение, геометрический образ.

changes of states of automatons, which is the model of workable system and a system containing defects of selected for analysis set of defects. To justify the main conclusions is used the theorem, in which the evidence contained in the papers, on which specified link.

Key words: system, automaton, control, diagnosing, experiment, automaton mapping, geometric image.

УДК 519.713

Твердохлебов, В. А.

Геометрические модели и методы в контроле и диагностировании сложных систем / В. А. Твердохлебов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 68–76.

УДК 621.396.6

ДИАГНОСТИКА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ИХ СОСТОЯНИЙ

А. Б. Щербань

В настоящее время проблема мониторинга и диагностики потенциально-опасных (ПОО) и критически важных (КВО) объектов представляется все более актуальной. Это объясняется повышением сложности таких объектов и превращением их в эргатические системы, элементами которых является человек, с постоянным усилением роли человеческого фактора в таких системах. При повышении сложности ПОО и КВО усиливается их взаимодействие с внешним окружением, которое необходимо рассматривать как эргатическую стохастическую надсистему.

Обобщенные требования к мониторингу и управлению технически сложными системами регламентированы ГОСТ Р1.12-2005, который устанавливает основные требования к построению структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами (СМИС). В ГОСТе указано, что СМИС необходимо строить на базе программно-технических средств, обеспечивающих передачу в реальном времени информации о состоянии ПОО для последующей обработки с целью оценки, предвидения и устранения последствий дестабилизирующих факторов.

Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций осуществляются различными организациями (Росгидромет, Федеральная система сейсмических наблюдений и прогноза землетрясений, включающая учреждения и наблюдательные сети РАН, МЧС, Минобороны, Госстроя). При этом используются различные методы и средства, от которых во многом зависит качество мониторинга, управления и прогноза, определяющим образом влияющее на эффективность снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций.

Обобщенно функционал системы мониторинга безопасности включает измерение и анализ параметров существенных свойств ПОО и КВО, определяющих их состояние, с целью формирования оценки состояния с точки зрения риска возникновения чрезвычайных ситуаций, прогнозирования траектории состояний и выработки управляющих воздействий для стабилизации траектории состояний и снижения риска возникновения ЧС. Исходя из функционала, принимаются решения по структуре системы мониторинга, ее организационно-техническому и аппаратно-программному обеспечению.

В настоящее время разработаны программно-технические комплексы оперативного управления безопасностью, которые содержат станции мониторинга параметров состояний (объектовые аппаратно-программные комплексы) и комплексы средств автоматизации ситуационных центров, предназначенные для контроля и наблюдения за ПОО и КВО, прогнозирования, оценки последствий и планирования действий по устранению чрезвычайных ситуаций.

Программное обеспечение таких комплексов позволяет рассчитывать возможную степень опасности чрезвычайных ситуаций и планировать действия аварийно-спасательных подразделений. При этом прогнозирование и предупреждение аварийных ситуаций осуществляется, как правило, на основе параметрической диагностики, т.е. путем контроля параметров процессов функционирования объектов и выявления отклонений их текущих значений от нормативных.

Однако даже абсолютно достоверной, максимально полной и своевременной информации о параметрическом состоянии диагностируемых объектов не во всех случаях бывает достаточно для прогнозов и выработки эффективных управленческих решений с целью надежного обеспечения безопасности ПОО и КВО и эффективного управления рисками. Проблема повышения точности и своевременности прогнозирования и выработки эффективных управляющих воздействий средствами комплексной мониторинговой системы остается актуальной, поскольку точность и своевременность принятия решений зависят от адекватности и полноты математических моделей, используемых для расчетов оценок, рисков и прогнозирования развития опасностей.

Альтернативной основой разрабатываемых автоматизированных систем мониторинга представляется структурный подход к разработке математического и информационно-алгоритмического обеспечения методов моделирования и прогнозирования состояний ПОО и КВО.

Структурный подход предполагает, что в условиях системного представления, целесообразно анализировать не отдельные параметры ПОО и КВО, а классы их состояний, т.е. применять принцип ситуационного управления [1, 2], позволяющий получать новые знания о динамике состояний управляемого объекта, необходимые для формализованного перехода к выбору способов управления на этапах предшествующих критическому развитию ситуаций.

Задачи диагностики в рамках структурного подхода предлагается формализовать как задачи идентификации синтаксических структурных моделей [2, 3–10] состояний ПОО и КВО. В результате решения таких задач каждому оцениваемому состоянию ставится в соответствие конкретное управляющее воздействие, препятствующее развитию критической траектории состояний, приводящей к чрезвычайной ситуации.

Предлагаемый структурный подход к диагностике и управлению ПОО и КВО дает возможность применять количественные методы структурного оценивания сложных систем путем перехода от параметрического оценивания состояний к анализу их синтаксических структурных моделей. Структурные модели предоставляют для анализа более полную и целостную формализованную информацию, позволяющую автоматизировать выбор адекватных управляющих воздействий и прогнозирование возможных траекторий состояний оцениваемого объекта.

В качестве основы идентификационно-структурного подхода к диагностике и управлению ПОО и КВО рассматривается принцип идентификационно-структурного управления [2].

В соответствии с принципом идентификационно-структурного управления задачи диагностики ПОО и КВО решаются как задачи идентификационно-структурного анализа, которые заключаются в поиске структурных отображений различных уровней «связноподобности» структурных моделей текущих состояний ПОО и КВО в классе множеств структурных моделей эталонных состояний.

Сущность применения идентификационно-структурного анализа представлена в виде *Use Case* диаграммы на рис. 1.

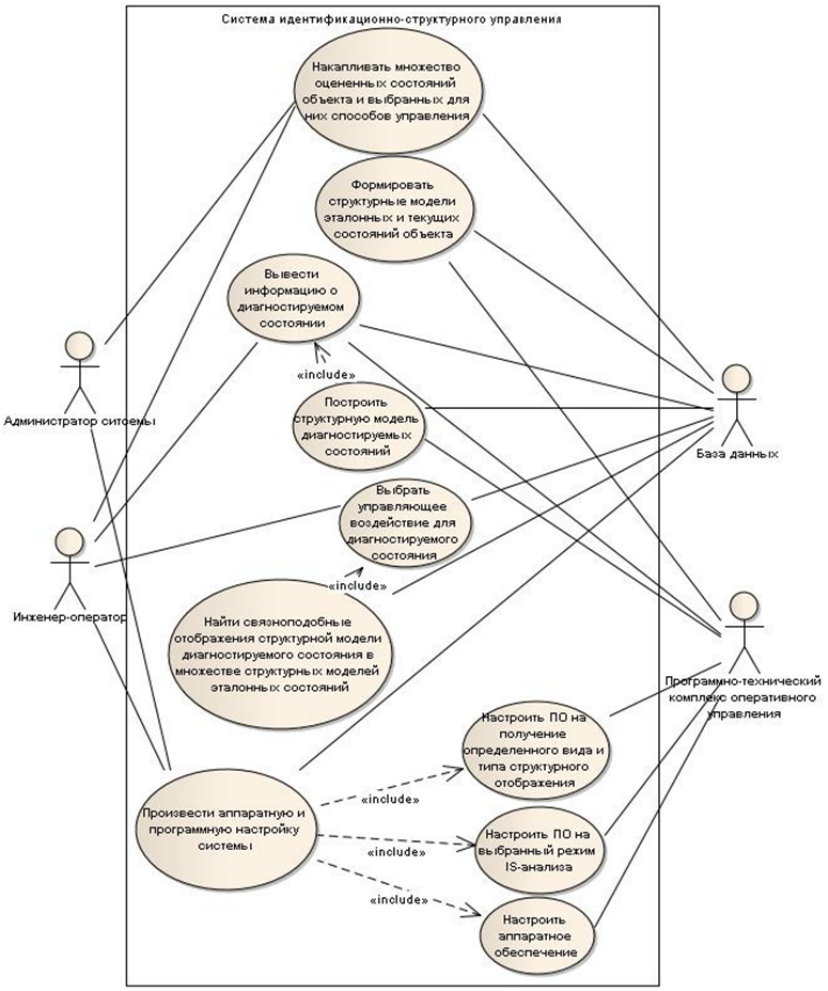


Рис. 1. Вариант обобщенной методики идентификационно-структурного управления ПОО и КВО

На рис. 1 в виде *Use Case* диаграммы показан возможный вариант обобщенной методики реализации принципа идентификационно-структурного управления (*S*-принципа), предлагаемой в качестве методологической концепции построения математического и программного обеспечения программно-технического комплекса оперативного управления безопасностью ПОО и КВО.

Принцип идентификационно-структурного управления (*S*-принцип) предполагает, что в распоряжении комплекса управления безопасностью ПОО и КВО имеется *m* вариантов управления. Число возможных вариантов управления, как правило, относительно небольшое и может быть определено предварительно на основе прогнозирования возможных состояний объекта управления.

Каждому варианту управления U_j, $j = 1,2,\ldots m$ соответствует множество состояний объекта управления, представленное множеством обобщенных структурных моделей структур текущих состояний (ОСМ СТС). Тогда возможное множество текущих состояний управляемого объекта ОСМ СТС можно формализовано представить в виде класса множеств $SC = \left\{SC^1, SC^2, \ldots SC^j, \ldots SC^n\right\}$, где $SC^j = \left\{sc_1^j, sc_2^j, \ldots sc_k^j, \ldots sc_r^j\right\}$ множество ОСМ СТС, описывающее подмножество текущих состояний ПОО и КВО, требующих управления U_j.

С другой стороны, на основе анализа истории состояний и вариантов управлений ПОО и КВО, с использованием вариантного анализа можно сформировать класс множеств ОСМ эталонных состояний (ОСМ СЭС) $SA = \left\{SA^1, SA^2, \ldots SA^j, \ldots SA^m\right\}$. Каждому множеству $SA^j = \left\{sa_1^j, sa_2^j, \ldots sa_k^j, \ldots sa_r^j\right\}$ этого класса должно соответствовать определенное управляющее воздействие.

Тогда в соответствии с принципом идентификационно-структурного управления (*S*-принципом) задача диагностики текущих состояний ПОО и КВО и выбора управлений с целью предотвращения критических ситуаций формулируется как задача поиска структурно близких (связноподобных) структурных отображений ОСМ СТС sc_k^j в классе множеств ОСМ СЭС. Найденное отображение $\varphi : sc_k^j \to sa_k^j \Rightarrow SA^j \Rightarrow U_j$ позволяет идентифицировать управляющее воздействие U_j, препятствующее развитию критической траектории состояний ПОО и КВО.

Кроме этого, если имеется класс множеств ОСМ СЭС $SA = \left\{SA^1, SA^2, \ldots SA^j, \ldots SA^m\right\}$, то каждому множеству $SA^j \subset SA$ можно поставить в соответствие некоторую ОСМ $sw_j \in SW$, где $SW = \left\{sw_1, sw_2^j, \ldots sw_j, \ldots sw_m\right\}$, которая имеет сходство структурной связности со всеми ОСМ соответствующего множества SA^j. Такую ОСМ $sw_j \subset SW$ можно интерпретировать как структурную модель обобщенного элемента множества SA^j или как обобщенный структурный образ ситуации, для которой наиболее целесообразным представляется выбранное управляющее воздействие U_j. Следовательно, каждому управляющему воздействию можно поставить в соответствие ОСМ некоторой эталонной ситуации (СЭСИ), в которой могут находиться ПОО и КВО.

В этом случае в соответствие с *S*-принципом идентификационно-структурного подхода к диагностике ПОО и КВО, для ОСМ СТС $sc_k^j \in SC^j$ необходимо найти сходную по структурной связности ОСМ в множестве СЭСИ, т.е. найти структурное отображение вида $\varphi : sc_k^j \to sw_j \Rightarrow U_j$, где φ – выбранный вид и тип отображения, определяющие условия связноподобности ОСМ, т.е. условия принадлежности текущего состояния управляемого ПОО или КВО некоторой эталонной ситуации, которой соответствует определенное управляющее воздействие.

Таким образом, идентификационно-структурный подход к диагностике и управлению ПОО и КВО сводится к формированию ОСМ СЭС, ОСМ СЭСИ, ОСМ СТС и формализованному поиску связноподобных структурных отображений ОСМ СЭС в классе множеств ОСМ СЭС или в множестве ОСМ СЭСИ.

Процесс идентификационно-структурной диагностики и управления ПОО и КВО условно разделим на два подпроцесса:

– подпроцесс структурного обучения;

– подпроцесс структурного управления.

Задачи поиска связноподобных структурных отображений, составляющих каждый подпроцесс, т.е. задачи идентификационно-структурного анализа ОСМ (*IS*-анализа) [3], при управлении ПОО и КВО можно решать в трех режимах:

– задачи «*IS*-анализа в режиме с обучением»;

– задачи «*IS*-анализа в режиме с частичным обучением»;

– задачи «*IS*-анализа в режиме без предварительного обучения».

В зависимости от режима идентификационно структурной диагностики ПОО и КВО можно получить различные схемы реализации *S*-принципа при управлении такими объектами. На рис. 2 приведена *Use Case* диаграмма идентификационно-структурного управления в режиме «с обучением».

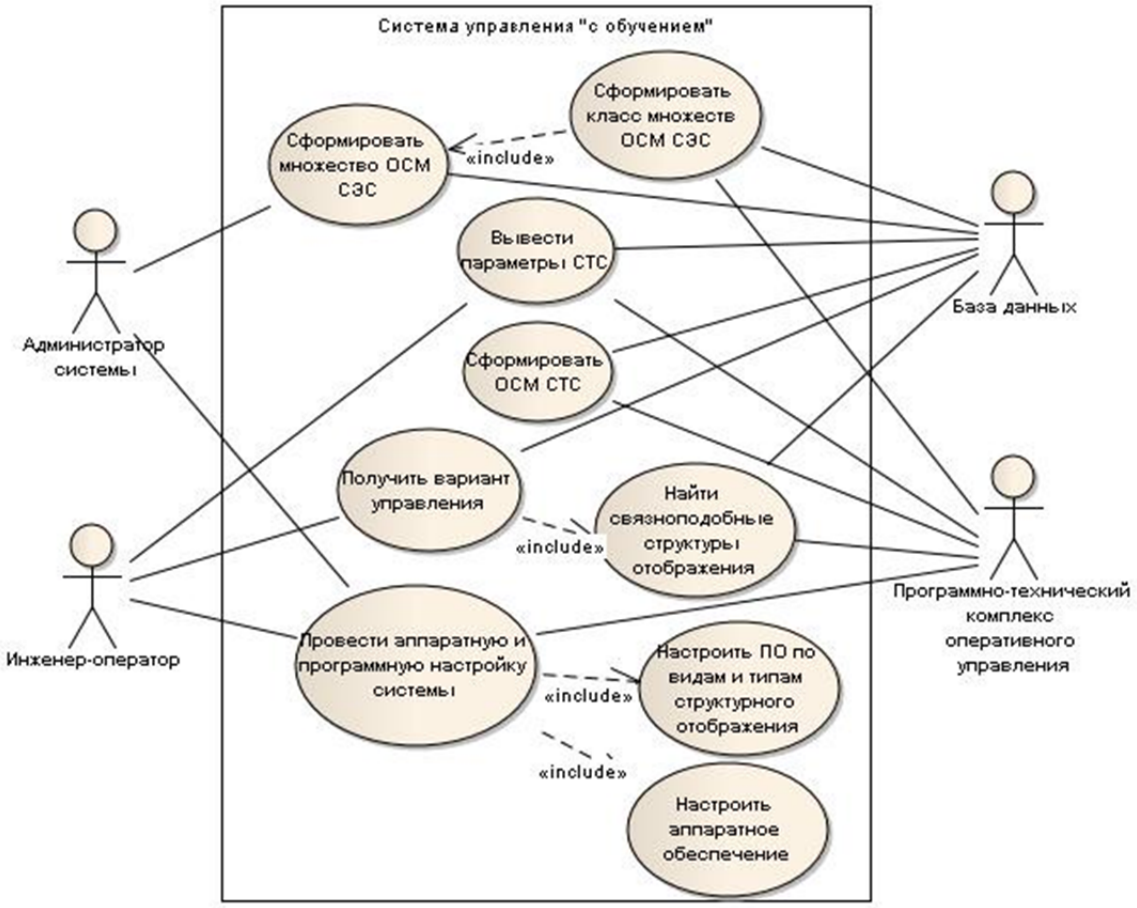


Рис. 2. Идентификационно-структурная диагностика и управление в режиме «с обучением»

К задачам *IS*-анализа с «обучением» отнесем все задачи подпроцессов структурного обучения и структурного управления, которые решаются в условиях заданного исходного множества ОСМ СЭС. В случае *IS*-анализа с обучением подпроцесс структурного обучения будет включать решение задач формирования ОСМ СЭС, ОСМ СТС и класса множеств связноподобных ОСМ СЭС $SA = \left\{SA^1, SA^2, \ldots SA^j, \ldots SA^m\right\}$. Подпроцесс структурного управления в этом случае заключается в поиске связноподобных отображений вида $\varphi : se_k^j \to sa_k^j$.

В случае формирования ОСМ СЭСИ получаем схему реализации *S*-принципа с частичным обучением. На рис. 3 приведена Use Case диаграмма идентификационно-структурного управления с частичным обучением.

К задачам *IS*-анализа «с частичным обучением» в первую очередь отнесем задачу формирования множества СЭСИ, когда известно множество СЭС и сформирован класс множеств ОСМ СЭС $SA = \left\{SA^1, SA^2, \ldots SA^j, \ldots SA^m\right\}$.

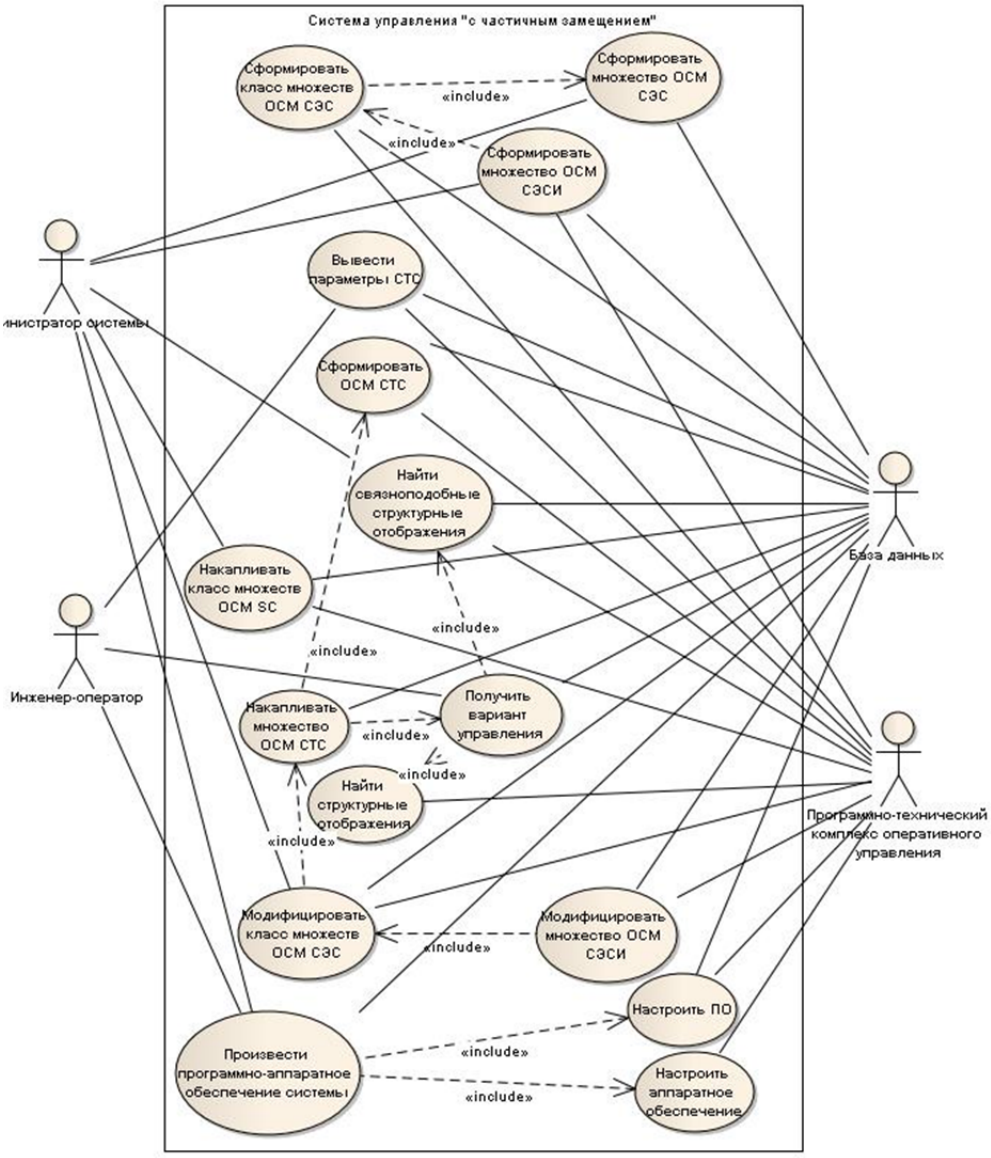


Рис. 3. Идентификационно-структурная диагностика и управление с частичным обучением

Кроме этого, задачами «с частичным обучением» будем считать задачи модификации класса множеств ОСМ СЭС и множества ОСМ СЭСИ. Если в процессе управления с обучением или с частичным обучением не удается получить связноподобное структурное отображение ОСМ СТС в множестве ОСМ СЭС или ОСМ СЭСИ требуемого вида, то тогда решение задачи управления с частичным обучением заключается в нахождении различных типов связноподобных отображений исследуемой ОСМ СТС в множестве ОСМ СТС, накопленных в процессе управления, т.е. в процессе дообучения системы.

К задачам «с частичным обучением» отнесем также задачи модификации класса множеств ОСМ СЭС и множества ОСМ СЭСИ с учетом решения предыдущей задачи.

Задачи *IS*-анализа ПОО и КВО в режиме «без предварительного обучения» определим как задачи структурной «автоидентификации», решаемые только на множестве накопленных ОСМ СТС. На рис. 4 приведена *Use Case* диаграмма идентификационно-структурного управления «без обучения».

В режиме «без предварительного обучения» можно решать задачи накопления класса множеств ОСМ СЭС и множества СЭСИ, а также задачу управления в условиях отсутствия исходного множества ОСМ СЭС.

Поскольку *S*-принцип наиболее целесообразно применять для диагностики и управления сложными эргатическими системами необходимо учитывать, что исходные множества СЭС могут

быть недостаточны для идентификации возможных СТС таких систем. Поэтому схема реализации *S*-принципа предлагается открытой, т.е. предусмотрены возможности накопления множества ОСМ СЭС и модификации множества ОСМ СЭСИ по мере накопления оцененных ОСМ СТС и принятых по ним управляющих воздействий.

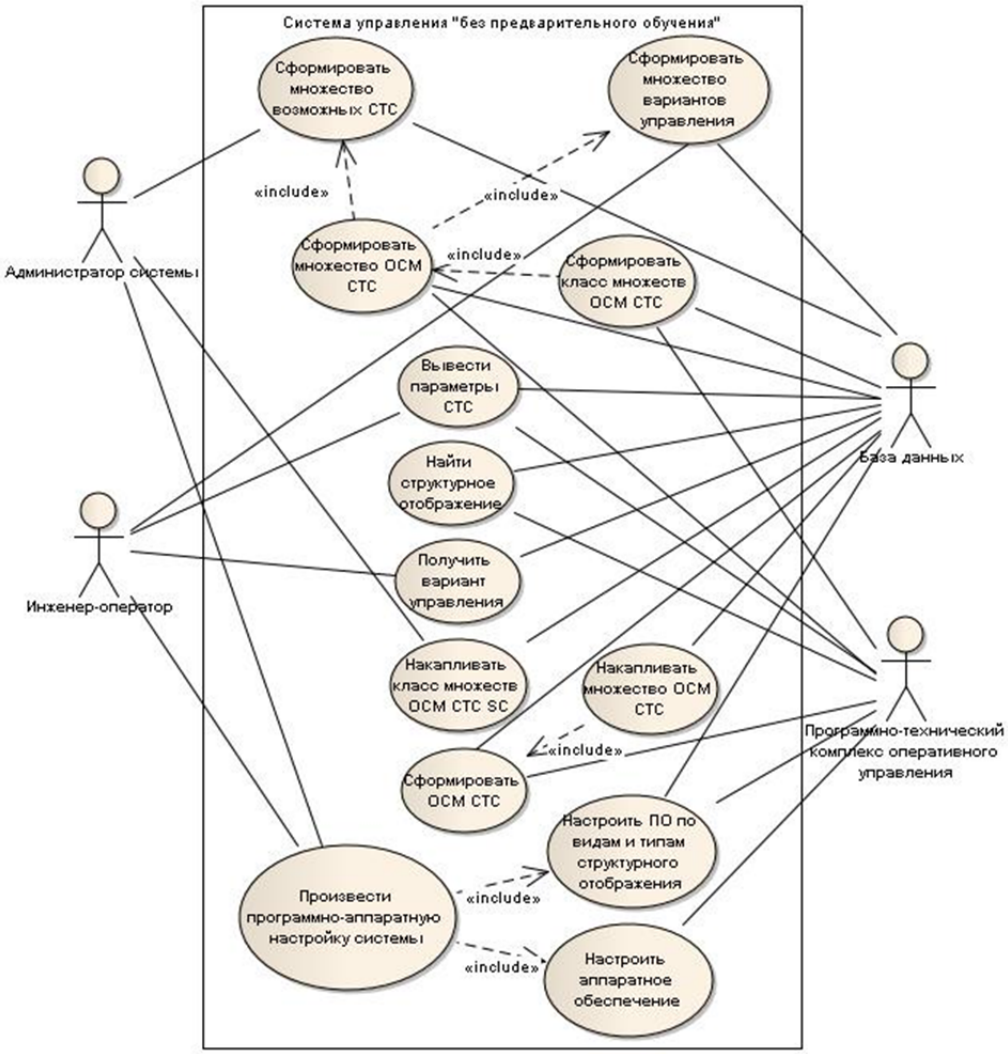


Рис. 4. Идетнификационно-структурная диагностика и управление «без обучения»

Предлагаемые варианты обобщенной схемы идентификационно-структурного управления ПОО и КВО обеспечивают возможности постоянного самообучения (дообучения) в процессе управления путем накопления исследуемых ОСМ СТС и принятых по ним управляющих воздействий с последующим изменением состава и увеличением мощностей класса множеств ОСМ СЭС и множества СЭСИ.

За счет непрерывного «дообучения» возможности системы идентификационно-структурной диагностики и управления ПОО и КВО будут постоянно увеличиваться, а следовательно, будет повышаться ее эффективность. Процесс «дообучения» подобной системы при небольшом количестве управлений завершится достаточно быстро, а процесс самообучения будет продолжаться непрерывно.

Решение задач идентификационно-структурного управления ПОО и КВО сводится к решению формализованных задач установления различных видов «связноподобности» двух или нескольких ОСМ СТС, ОСМ СЭС, ОСМ СЭСИ.

В терминах обобщенных структурных моделей [2] такие задачи интерпретированы как задачи формирования различных видов «связноподобных» взаимных отображений ОСМ различных типов структурной близости, представленные в виде математических моделей *IS*-анализа [4].

В качестве видов связноподобных отображений ОСМ предлагаются изоморфные, частично-изоморфные и гомоморфные отображения.

В терминах видов структурных отображений ОСМ СТС, ОСМ СЭС, ОСМ СЭСИ в соответствии с формализованным постановлением задач структурной идентификации [14,16] разработаны обобщенные методы решения задач управления ПОО и КВО, инвариантные относительно специфики реальных объектов и способов их структурного представления. Разработанные методы могут служить основой программного обеспечения объектовых программно-аппаратных комплексов и средств автоматизации контроля управления и прогнозирования чрезвычайных ситуаций ПОО и КВО [15].

Предлагаемый подход к организации диагностики и управления ПОО и КВО позволяет автоматизировать процесс синтеза математических моделей информационных процессов, описывающих их состояния на основе разработанного математического аппарата формализованного структурного описания состояний системы [2]. Разработанный математический аппарат формализации постановок задач поиска различных видов связноподобных структурных отображений (изоморфных, частично-изоморфных и гомоморфных) позволяет объединить в рамках единой методологии методы поиска структурных отображений различной степени «связноподобности»и автоматизировать моделирование и объективную оценку текущих состояний ПОО и КВО с целью выявления критических состояний и траекторий, адекватного реагирования на подобные состояния для обеспечения функциональной стабильности объектов.

Список литературы

1. Щербань, А. Б. Обобщенные структурные модели информационных объектов / А. Б. Щербань, К. Е. Братцев, Т. В. Жашкова и др. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 12–20.
2. Щербань, А. Б. Структурно- синтаксический подход к поиску альтернатив управления сложными системами / А. Ф. Зубков, А. Б. Щербань, И. А. Симонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2010. – № 3 (101). – С. 45–49.
3. Щербань, А. Б. Классификация задач IS-анализа / А. Б. Щербань // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 2. – С. 3–12.
4. Mikheev, M. U. On the multilevel information model of behavior of groups of autonomous intelligent agents for biomedical systems / M. U. Mikheev, V. V. Istomin, T. V. Istomina // Инновационные информационные технологии : III Междунар. науч.-практ. конф. / Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ. – Прага, Чехия, 2014. – № 1. – С. 385–395.
5. Жашкова, Т. В. Обобщенная процедура синтеза алгоритмов нейросетевой идентификации на базе теории целых функций экспоненциального типа / Т. В. Жашкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 4 (24). – URL: http://www.aspu.ru/images/File/Izdatelstvo/Prikspiiskii %204(24)2013/94-101.pdf.
6. Inreasing the precision of metrological characteristics of smart sensors in large scale monitoring systems / М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев и др. // Инновационные информационные технологии : III Междунар. науч.-практ. конф. / Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ. – Прага, Чехия, 2014. – № 2. – С. 370–375.
7. Михеев, М. Ю. Применение UML-моделирования для управления структурной динамикой сложных технических систем нейросетевой идентификации сигналов сложной формы / М. Ю. Михеев, С. А. Исаков, Е. Н. Мурашкина // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 244–247.
8. Михеев, М. Ю. Разработка диаграммы вариантов использования датчиков на ПАВ / М. Ю. Михеев, С. А. Исаков, Е. Н. Мурашкина // Современные информационные технологии : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2014. – Вып. 14. – С. 57–60.
9. Михеев, М. Ю. Реализация модельно-ориентированного подхода при проектировании системы сбора данных / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, Е. А.Гудкова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 304. – URL: www.science-education.ru/120-16833.
10. Щербань, А. Б. Модель IS-анализа сложных физических систем (тезисы) / А. Б. Щербань, Т. В. Жашкова, К. Е. Братцев // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2009. –Т. 16, вып. 3. – С. 571–572.
11. Щербань, А. Б. Теоретико-множественный подход к формированию структурных моделей сложных информационных систем обучения / А. Б. Щербань, А. В. Новиков // Открытое образование. – 2009. – № 5. – С. 30–35.
12. Щербань, А. Б. Идентификационно-структурное управление как поиск гомоморфных отображений структурных моделей / А. Б. Щербань // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2012. – № 3 – С. 174–182.

13. Щербань, А. Б. Формализация структурных моделей сигналов / А. Б. Щербань, А. Г. Дмитриенко, В. В. Соловьев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер. «Технические науки». – 2012. – № 4. – С. 161–173.
14. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 18–24.
15. 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.

Щербань Александр Борисович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 13)
(8412) 49-60-09
E-mail: schas999@yandex.ru

Shcherban' Aleksandr Borisovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technologies
and systems,
Penza State Technological University
(440039, 13 Gagarin street, Penza, Russia)

Аннотация. Рассматривается подход к повышению точности и своевременности принятия решений по управлению потенциально опасными объектами, основанный на автоматизированном построении структурных моделей диагностируемых состояний и идентификационном структурном анализе полученных моделей.

Abstract. We consider the approach to increase of accuracy and timeliness of decision making on management of potentially dangerous objects based on the automated creation of structural models of the diagnosed conditions and the identification structural analysis of the received models.

Ключевые слова: критически важные объекты, система диагностики и управления технически сложными объектами, идентификационно-структурный подход, идентификационно-структурный анализ.

Key words: critical facilities, diagnostics and management of technically complex objects, identification and structural approach, identification and structural analysis.

УДК 621.396.6
Щербань, А. Б.
Диагностика критически важных объектов на основе идентификационного структурного анализа их состояний / А. Б. Щербань // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 77–84.

УДК 004.75

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТКИ ВСТРАИВАЕМОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

К. И. Володин, А. И. Переходов

В последнее время наблюдается бурное развитие сенсорных сетей и расширение сферы их применения. Использование недорогих беспроводных сенсорных устройств контроля параметров открывает новые области для применения систем телеметрии и контроля в различных областях: от мониторинга окружающей среды до промышленной автоматизации и здравоохранения [1–3] (рис. 1).

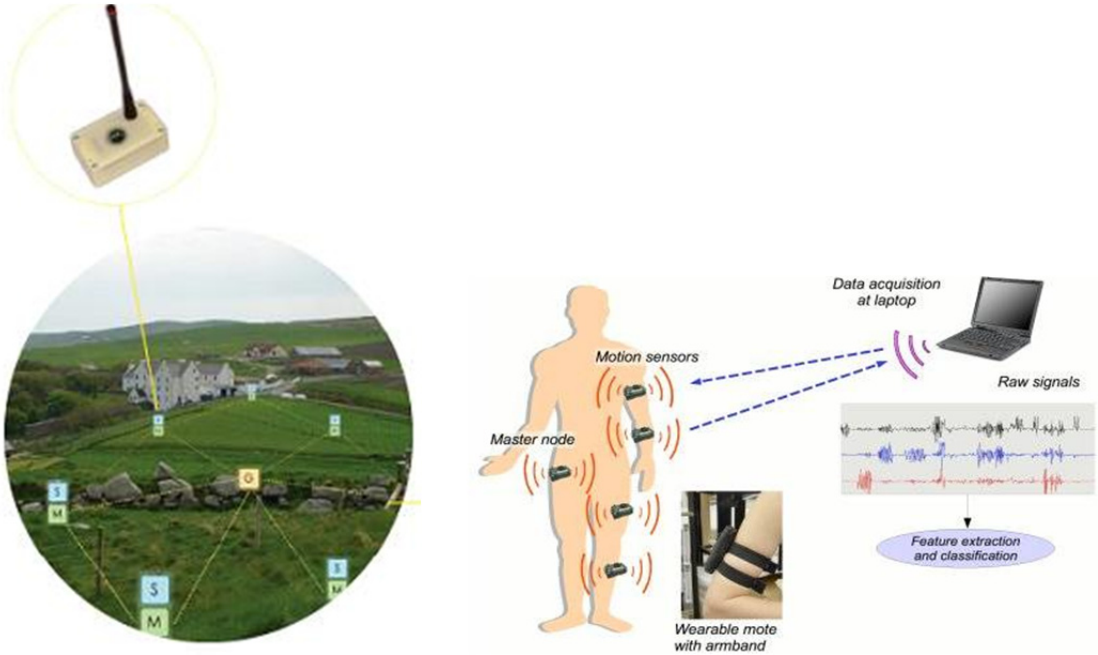


Рис. 1. Применение сенсорных сетей различного назначения

В связи с этим необходимо учитывать потребность в эффективных алгоритмах работы узлов сенсорных сетей. Современные методы проектирования позволяют упростить процесс создания алгоритмического и программного обеспечения сенсорных сетей, используя модельно-ориентированный подход. При применении данного подхода разработчику необходимо лишь продумать алгоритм работы и реализовать его через системную модель, а программное обеспечение узлов сенсорной сети будет синтезировано автоматически из модели [4, 5].

Основной задачей является разработка информационной системы сопровождения разработки встраиваемого программного обеспечения для беспроводных сенсорных сетей, в рамках которой необходимо разработать пакет расширений среды MathWorks MATLAB&Simulink [6] для целевого оборудования на базе технологий Nordic Semiconductor [7], обеспечивающий возможность генерации кода из моделей Simulink для узлов сенсорной сети. Данный пакет расширений даст возможность синтеза встраиваемого программного обеспечения узлов адаптивных распределенных сенсорных сетей, что в свою очередь позволит упростить процесс построения поведенческих моделей для беспроводных сенсорных сетей, сократить время и издержки [8].

Для декларативного описания того, как устроен и функционирует разрабатываемый пакет расширений среды MathWorks MATLAB&Simulink UML, используется диаграмма вариантов использования (рис. 2).

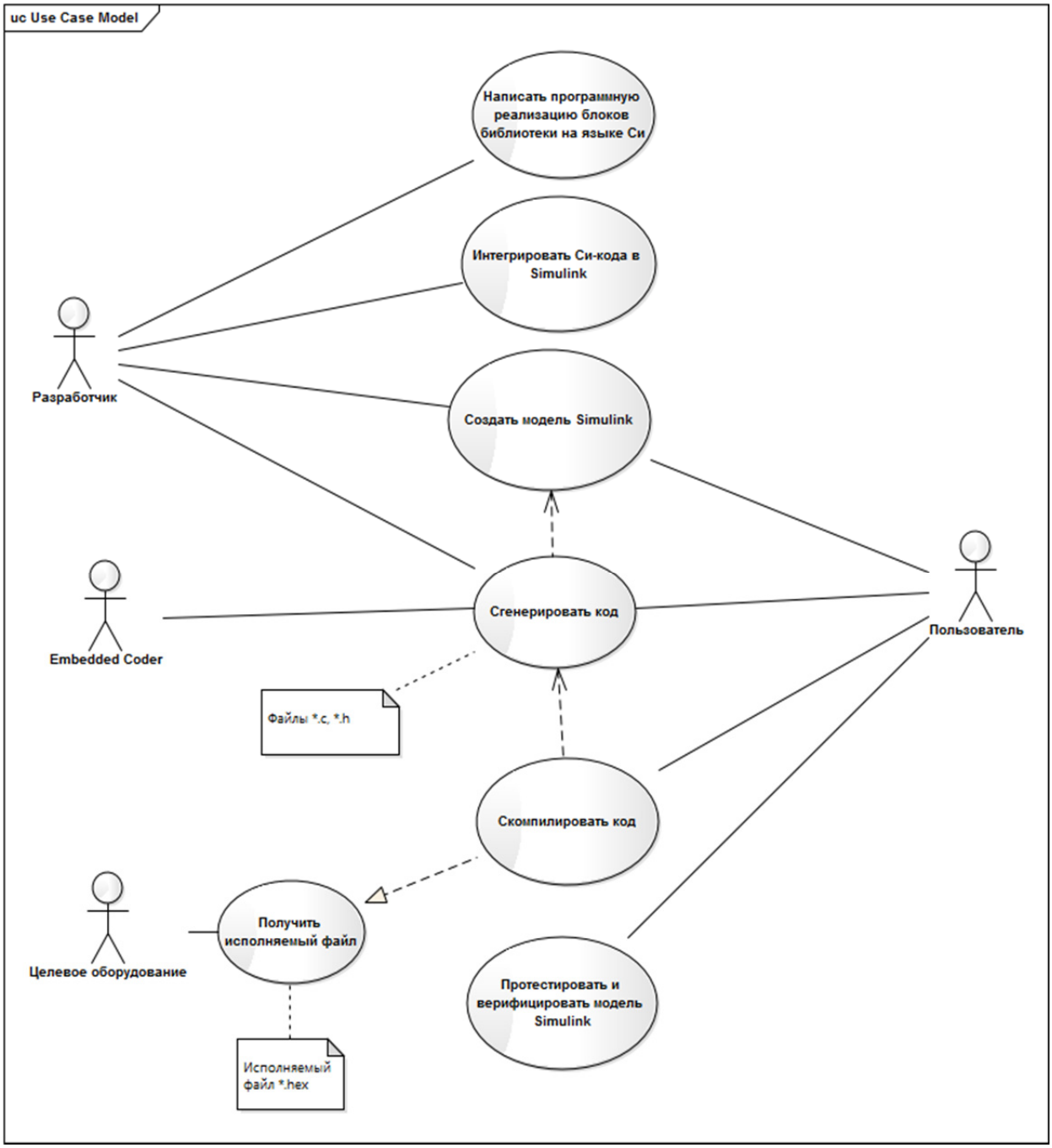


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования разрабатываемого пакета расширений среды MathWorks MATLAB&Simulink

На диаграмме вариантов использования проектируемый пакет расширений среды MathWorks MATLAB&Simulink для целевого оборудования представляется в виде актеров, взаимодействующих с системой с помощью вариантов использования. Данная диаграмма указывает назначение проектируемого пакета, но не указывает на методы реализации.

Для моделирования пакета расширений используется UML диаграмма компонентов, отражающая разбиение программной системы на структурные компоненты и зависимости между компонентами.

Диаграмма компонентов разработана для визуализации общей структуры исходного кода программной системы, спецификации исполняемого варианта программной системы, представления концептуальной и физической схем данных. Она обеспечивает согласованный переход от логического представления к конкретной реализации проекта в форме программного кода (рис. 3).

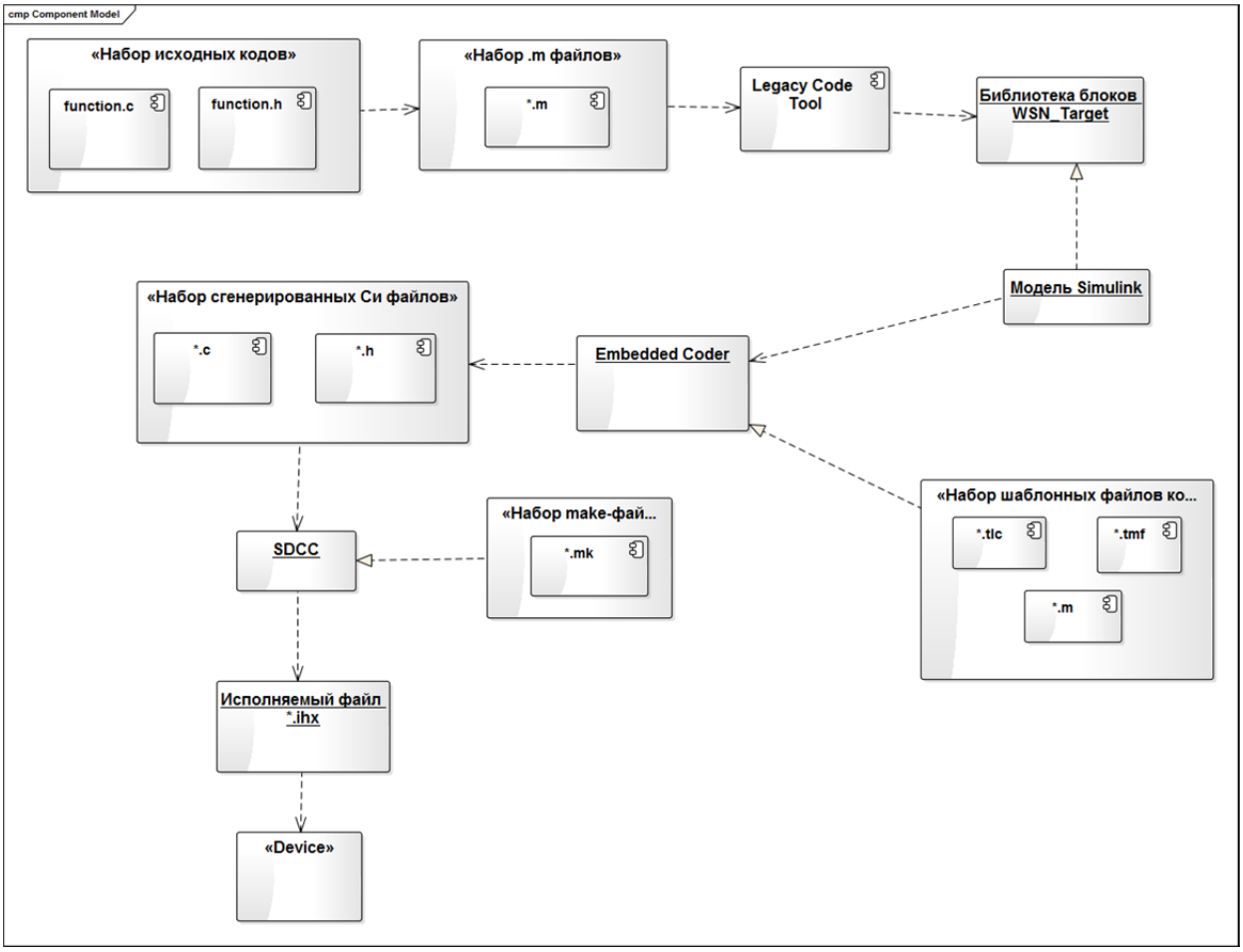


Рис. 3. Диаграмма компонентов разрабатываемого пакета расширений среды MathWorks MATLAB&Simulink

Для реализации проекта была выбрана среда Matlab&Simulink, поскольку она позволяет реализовать данный проект в рамках одной целостной системы, не прибегая к сторонним ресурсам, а также пакеты расширений к ней, в частности Embedded Coder[9], Simulink Coder [9], Matlab Coder, Legacy Code Tool и др. [11, 12].

В результате анализа существующих пакетов расширений среды Matlab&Simulink была выявлена типовая структура пакета расширений.

Каждый пакет расширений среды MathWorks MATLAB&Simulink для целевого оборудования имеет индивидуальный набор необходимых для работы компонентов, но обязательными являются исходный код специфичных функций оборудования, библиотека блоков Simulink, основной набор файлов-шаблонов для генерации (.m, .tlc, .tmf), скрипты автоматизированной установки и настройки [13].

В процессе разработки пакета расширений возникла необходимость интеграции внешнего Си кода в MATLAB&Simulink, который будет использоваться для реализации блоков Simulink.

Legacy Code Tool – утилита, которая позволяет автоматически генерировать *S*-функцию из существующего Си кода и спецификаций, описанных с помощью кода MATLAB, а также преобразовывать *C* функции в *C* MEX *S*-функции для использования в моделях Simulink. Legacy Code Tool дает возможность интегрировать существующие *C* (или *C* + +) функции и интерфейсы в модели Simulink. Используя написанные на языке MATLAB спецификации, которые указывает разработчик, инструмент преобразует существующие функции в *C* MEX *S*-функции, которые можно использовать в моделях Simulink [14].

По сравнению с использованием S-Function Builder или написанием *S*-функции вручную, инструмент Legacy Code Tool проще в использовании, и он генерирует оптимизированный код, что необходимо для встраиваемых систем.

Рисунок 4 иллюстрирует общую процедуру интеграции Си кода в Simulink с использованием Legacy Code Tool.

Рис. 4. Процедура интеграции Си кода в Simulink с использованием Legacy Code Tool

Для взаимодействия с Legacy Code Tool, необходимо инициализировать структуру данных Legacy Code Tool, указав имя для *S*-функции, спецификации для существующих функций *C*, файлы исходного кода на языке Си и пути, необходимые для компиляции, опции для генерируемой *S*-функции. Затем происходят генерация исходного кода для *S*-функции, ее компиляция и создание блока S-function с маской.

К основным преимуществам Legacy Code Tool следует отнести возможность автоматизированного синтеза *S*-функций и автоматизированного создания блока *S*-function. Кроме того, это самый быстрый способ переноса Си кода в Simulink. Основным недостатком Legacy Code Tool является отсутствие возможности автоматически добавить дополнительный код к вызовам внешних функций и ограниченные возможности по управлению внешним видом *S*-функций.

Разрабатываемый пакет расширений дает возможность создавать поведенческие модели узлов сенсорных сетей на базе технологий Nordic Semiconductor и автоматически синтезировать встраиваемое программное обеспечение для них.

Автоматизированная генерация Си кода из модели Simulink осуществляется в рамках концепции модельно-ориентированного проектирования. Таким образом, встраиваемое программное обеспечение будет синтезировано автоматически из моделей Simulink при использовании продукта Embedded Coder, являющегося расширением среды MathWorks MATLAB&Simulink.

Для реализации автоматизированного синтеза кода из моделей, созданных с использованием разрабатываемого пакета расширений были разработаны файлы-шаблоны с расширением *.m, *.tlc, позволяющие автоматически генерировать из модели Си код, используя пакеты расширения среды MATLAB&Simulink Embedded Coder, Simulink Coder и MATLAB Coder, и шаблонный make-файл *.tmf, указывающий правила сборки кода. Затем код компилируется под определенный вид целевого оборудования.

Полученный таким образом исполняемый hex-файл [13] с микропрограммным обеспечением записывается в память микроконтроллера на базе технологий Nordic Semiconductor с использованием разработанной утилиты nrfflasher. Схема автоматизированной генерации кода из модели Simulink представлена на рис. 5.

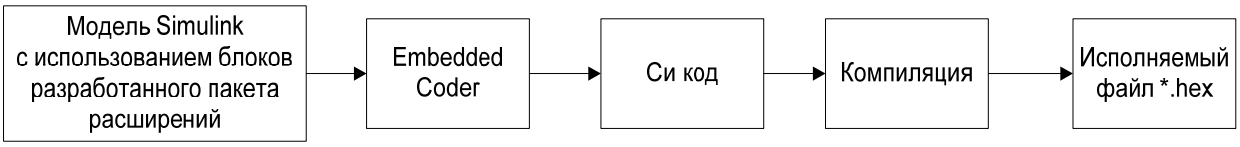


Рис. 5. Схема автоматизированной генерации кода из модели Simulink

Одним из неотъемлемых элементов пакета расширения работы для целевого оборудования является скрипт автоматической установки и настройки. Он дает возможность установить WSN Target и добавить новую библиотеку блоков WSN Target к уже установленным библиотекам Simulink.

Таким образом, полученный пакет расширений даст возможность автоматизированной генерации встраиваемого программного обеспечения для беспроводных сенсорных сетей, спроектированных в рамках сенсорной платформы на базе технологий Nordic Semiconductor. В перспективе библиотеку блоков необходимо расширить в сторону увеличения функциональности.

Данная технология автоматизированного синтеза кода может быть применена для других технически сложных систем [14–18].

Работа проведена на базе учебно-научной лаборатории «Проектно-ориентированное обучение» кафедры «Информационные технологии и системы» ПензГТУ.

Список литературы

1. An Active Cooperation-Aware Spectrum Allocation Mechanism for Body Sensor Networks / Fu Jiang, Ying Guo, Jun Pengand, Jiankun Hu. – URL: http://www.mdpi.com/1424-8220/15/2/2812.
2. Proactive and Reactive Transmission Power Control for Energy-Efficient On-Body Communications. – URL: http://www.mdpi.com/1424-8220/15/3/5914.
3. Secure Publish-Subscribe Protocols for Heterogeneous Medical Wireless Body Area Networks. – URL: http://www.mdpi.com/1424-8220/14/12/22619.
4. Володин, К. И. Применение модельно-ориентированного подхода при сквозном проектировании адаптивных распределенных сенсорных сетей / К. И. Володин // Инновационные технологии в экономике, информатике и медицине : сб. ст. VIII Межрег. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2011. – 266 с.
5. Володин, К. И. Разработка макета поведенческой модели устройства сопряжения модельного и натурного экспериментов в рамках синтеза адаптивных распределенных сенсорных сетей / К. И. Володин, А. И. Переходов // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2012. – С. 99–112.
6. Официальный сайт компании MathWorks. – URL: www.mathworks.com/, свободный.
7. Официальный сайт компании Nordic VLSI. – URL: http://www.nordicsemi.com/, свободный.
8. Володин, К. И. Разработка программно-аппаратной платформы тестирования алгоритмов адаптивных распределенных сенсорных сетей / К. И. Володин, А. И. Переходов // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2013. – С. 187–194.
9. Официальный сайт компании MathWorks. – URL: http://www.mathworks.com/products/embedded-coder/, свободный.
10. Переходов, А. И. Анализ программных средств MathWorks MATLAB&Simulink для синтеза поведенческих моделей узлов сенсорных сетей / А. И. Переходов // Молодой ученый. – 2013. – № 7 (54). – С. 63–67.
11. Володин, К. И. Анализ основных возможностей Legacy Code Tool среды MATLAB&Simulink и его применимости для создания библиотеки блоков Simulink в рамках концепции синтеза программного обеспечения беспроводных адаптивных распределенных сенсорных сетей / К. И. Володин, А. И. Переходов // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2014. – С. 54–59.
12. Официальный сайт компании Microsym Computers Inc. – URL: http://microsym.com/editor/assets/intelhex.pdf, свободный.
13. Способ автоматической поверки кориолисовых расходомеров на месте их эксплуатации / М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, Н. К. Юрков, К. В. Гудков // Измерительная техника. – 2012. – № 2.– С. 29–32.
14. Михеев, М. Ю. Реализация модельно-ориентированного подхода при проектировании системы сбора данных / М. Ю. Михеев, Е. А. Гудкова, К. В. Гудков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 64–69.
15. Современные технические решения и проблемы в обеспечении комплексной безопасности / С. В. Волков, В. И. Кулапин, А. В. Светлов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4. – С. 61–68.
16. Методика обеспечения информационной безопасности / В. В. Шишкин, Н. К. Юрков, Н. Ж. Мусин // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 9–13.
17. A method of automatic verification of Coriolis flowmeters in the field / N. K. Yurkov, K. V. Gudkov, M. Yu. Mikheev, V. A.Yurmanov // Measurement Techniques. – 2012. – V. 55. – May. – Issue 2. – P. 151–155.
18. Systems of Coriolis flowmeters in the field / N. K. Yurkov, K. V. Gudkov, M. Yu. Mikheev, V. A. Yurmanov // Measurement Techniques. – 2012. – V. 55. – November. – Issue 6. – P. 132–139.

Володин Константин Игоревич
старший преподаватель,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 13)
(8412) 49-60-09
e-mail: volodin.konstantin@gmail.com

Переходов Александр Игоревич
студент,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 13)
(8412) 49-60-09
E-mail: Sebefour@gmail.com

Volodin Konstantin Igorevich
senior teacher,
sub-department of information technologies
and systems,
Penza State Technological University
(440039, 13 Gagarin street, Penza, Russia)

Perekhodov Aleksandr Igorevich
student,
Penza State Technological University
(440039, 13 Gagarin street, Penza, Russia)

Аннотация. В рамках информационной системы разработана библиотека пакета расширений среды MathWorks MATLAB&Simulink для микроконтроллера на базе технологий Nordic Semiconductor. Разрабатываемый пакет позволит реализовать подход модельно-ориентированного проектирования с возможностью последующей генерации исходного кода из разработанных моделей для сенсорных сетей на базе технологий Nordic Semiconductor.

Ключевые слова: сенсорная сеть, сенсорная платформа, передача данных, обработка данных, адаптивные распределенные сенсорные сети, распределенные сенсорные сети, распределенные сети, автоматизированный синтез кода, Legacy Code Tool, MATLAB, модельно-ориентированное проектирование, кодогенерация.

Abstract. As part of information system was developed library with extensions for MathWorks MATLAB & Simulink for microcontroller which based on Nordic Semiconductor technology. Developing a package will implement the approach Model-Based Design with the possibility of generating source code from models developed for sensor networks based on Nordic Semiconductor technologies.

Key words: sensor network, sensor platform, data transfer, data processing, adaptive distributed sensor networks, distributed sensor networks, distributed networks, automated synthesis code, Legacy Code Tool, MATLAB, model-based design, the code generation.

УДК 004.75

Володин, К. И.

Информационная система сопровождения разработки встраиваемого программного обеспечения для беспроводных сенсорных сетей / К. И. Володин, А. И. Переходов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 85–90.

УДК 004.02

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЗИСТОРОВ

А. Ю. Доросинский, В. Г. Недорезов

Разработка и совершенствование различных изделий электронной техники в плане улучшения технических характеристик неизбежно связаны с необходимостью проведения комплексов трудоемких измерений, которые не всегда возможны с помощью стандартных измерительных устройств.

Это связано с тем, что использование комплекса стандартных измерительных приборов порождает ряд проблем, таких как:

– согласование устройств;

– неудобство управления;

– исключение возможности автоматизации процесса измерений и т.д.

Учитывая вышеперечисленные недостатки, в некоторых случаях целесообразно использовать специально разработанные устройства, ориентированные на выполнение широкого спектра специфических измерительных задач и реализуемые в виде информационно-измерительной системы. Поэтому многие предприятия ведут работы по разработке таких систем, которые впоследствии активно применяются на производстве. Основные концепции построения подобных измерительных систем подробно рассмотрены в [1]. Вышесказанное актуально и для отраслей производства, связанных с выпуском переменных резисторов. Проведенные исследования на примере ОАО «НИИЭМП» показали, что существует достаточно большое количество различных технологических приспособлений и устройств, предназначенных для частичной автоматизации необходимых испытаний. На основании этого актуальной является разработка информационно-измерительной системы, позволяющей не только автоматизировать, но и в значительной степени повысить достоверность проводимых исследований.

На основании анализа нормативных документов авторами настоящей статьи были выявлены наиболее трудоемкие виды испытаний, подлежащие автоматизации, представленные на рис. 1.

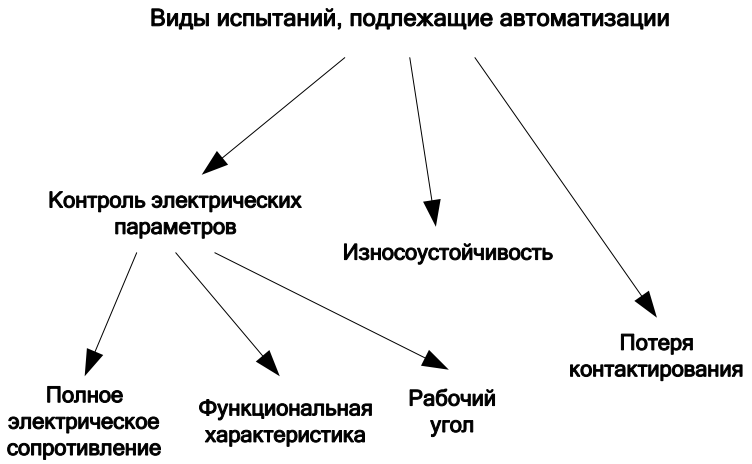


Рис. 1. Виды испытаний переменных резисторов, подлежащие автоматизации

На основании проведенного анализа авторами статьи была разработана информационно-измерительная система, позволяющая автоматизировать испытания, направленные как на измере-

ние электрических параметров переменных резисторов, так и испытания на износоустойчивость и проверку потери контактирования. Информационно-измерительная система была разработана с учетом следующих требований:

– проведение испытаний с учетом требований нормативной и технической документации;

– автоматизация трудоемких испытаний, требующих значительных временных и аппаратурных затрат;

– возможность сохранения результатов на ПК для проведения дополнительных исследований.

Внешний вид разработанной информационно-измерительной системы представлен на рис. 2.

Рис. 2. Внешний вид информационно-измерительной системы

Данная система внедрена в производство ОАО «НИИЭМП». Система проектировалась как универсальная для получения возможности проводить испытания широкого спектра изделий, таких как подстроечные резисторы, регулировочные резисторы и потенциометры.

Для испытаний серийно выпускаемых изделий в системе предусмотрено десять независимых измерительных каналов, а также контактно-зажимное устройство, совмещенное с устройством вращения на десять посадочных мест для испытуемых изделий (рис. 3).

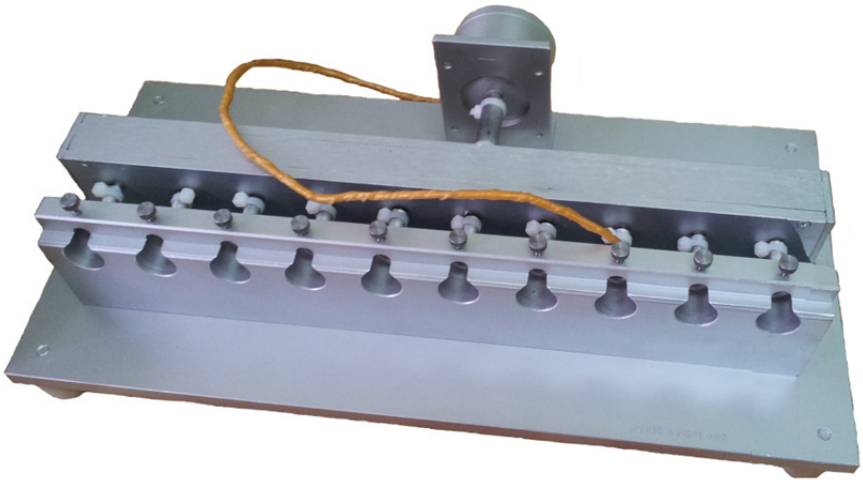


Рис. 3. Контактно-зажимное устройство

Для гибкого управления информационно-измерительной системой также было разработано прикладное программное обеспечение, позволяющее: визуализировать функциональную характеристику (ФХ) испытуемого переменного резистора; осуществлять перенастройку системы в зависимости от требований, предъявляемых к испытаниям; обеспечивать управление процессом испытаний, в том числе и удаленно; сохранять полученные экспериментальные данные в различных форматах (*.xls, *.mdl, *.txt).

Интерфейсы программ для информационно-измерительной системы представлены на рис. 4.

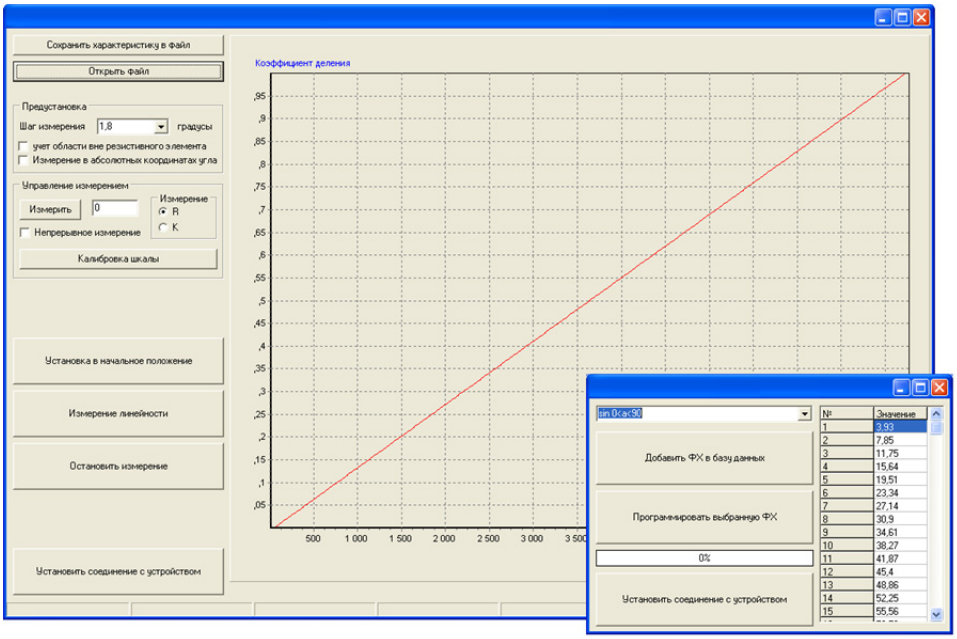


Рис. 4. Интерфейсы программ для информационно-измерительной системы

Оценка ФХ различается для потенциометров и подстроечных резисторов в силу их функционального назначения. Так, если для потенциометров контролируется отклонение ФХ относительно номинальной характеристики, то для подстроечных резисторов контролируется плавность ФХ. Эти два параметра, несмотря на схожесть в получении измерительных данных, имеют существенные различия, поскольку плавность ФХ подразумевает отсутствие смены знака первой производной и является качественным параметром, а отклонение ФХ относительно номинальной выражается в процентном отклонении, т.е. в количественном виде.

Причем если ФХ имеет линейную зависимость, то отклонение ФХ от номинальной линейной характеристики называют линейностью. Для получения возможности осуществлять контроль ФХ любой формы, программное обеспечение построено таким образом, что номинальные значения ФХ в заданных точках перезаписываются с помощью специально разработанной программы. Алгоритм обработки информации при этом не меняется.

Практика показывает, что определение параметров ФХ связанно с определенными трудностями, а именно, с точки зрения построения алгоритмов обработки информации, обладающих высокой достоверностью.

Исследования, проведенные в этой области, показали, что оптимальным, с точки зрения достоверности, является применение математического аппарата бесконечнозначной логики, развитого В. И. Левиным [2]. Методика определения плавности ФХ подробно описана в [3].

Измерение отклонения ФХ от номинала требует несколько иного подхода в рамках предложенного математического аппарата бесконечнозначной логики. Авторами статьи были проведены работы по разработке алгоритма, вычисляющего отклонение ФХ от номинальной.

Идея заключается в том, что интервал, на котором задана функция $y = f(x)$, разбивается на $n-1$ равных подынтервалов. В результате чего функция становится приближенно заданной системой n точек (при этом n – количество контрольных точек, в которых осуществляется контроль ФХ):

$$M_1(x_1, y_1); \quad M_2(x_2, y_2); \quad ...; \quad M_n(x_n, y_n).$$

На первом этапе необходимо представить измеренную ФХ в виде отклонения от номинальной характеристики, для чего множество точек {y} отображается в множество точек {Δ} с помощью выражения $\Delta_i = y_i - y_i^{\text{ном}}$.

Так как в большинстве случаев количественное отклонение ФХ определяется относительно модулей наибольших положительного и отрицательного отклонений [4, 5], в множестве точек {Δ} достаточно найти максимальное и минимальное значения.

При этом

$$\Delta^{+}_{\text{макс}} = \bigvee_{i=1}^{n} \Delta_i \text{, а } \Delta^{-}_{\text{мин}} = \bigwedge_{i=1}^{n} \Delta_i \text{,}$$

где $\vee$ – операция дизъюнкции, результатом которой является значение переменной, имеющей наибольшее значение из множества; $\wedge$ – операция конъюнкции, результатом которой является значение переменной, имеющей наименьшее значение из множества.

После определения максимальных и минимальных значений необходимо проверить, находится ли $\Delta^{-}_{\text{мин}}$ в отрицательной области. Для этого используется следующая функция:

$$\Delta^{-}_{\text{мин}} = \begin{cases} \left|\Delta^{-}_{\text{мин}}\right| & \text{если} \quad \Delta^{-}_{\text{мин}} < 0 \\ 0 & \text{если} \quad \Delta^{-}_{\text{мин}} \geq 0 \end{cases} .$$

Далее на основании полученных максимальных отклонений в положительной и отрицательной области вычисляется значение линейности.

Алгоритм вычисления отклонения реальной ФХ от номинальной ФХ представлен на рис. 5.

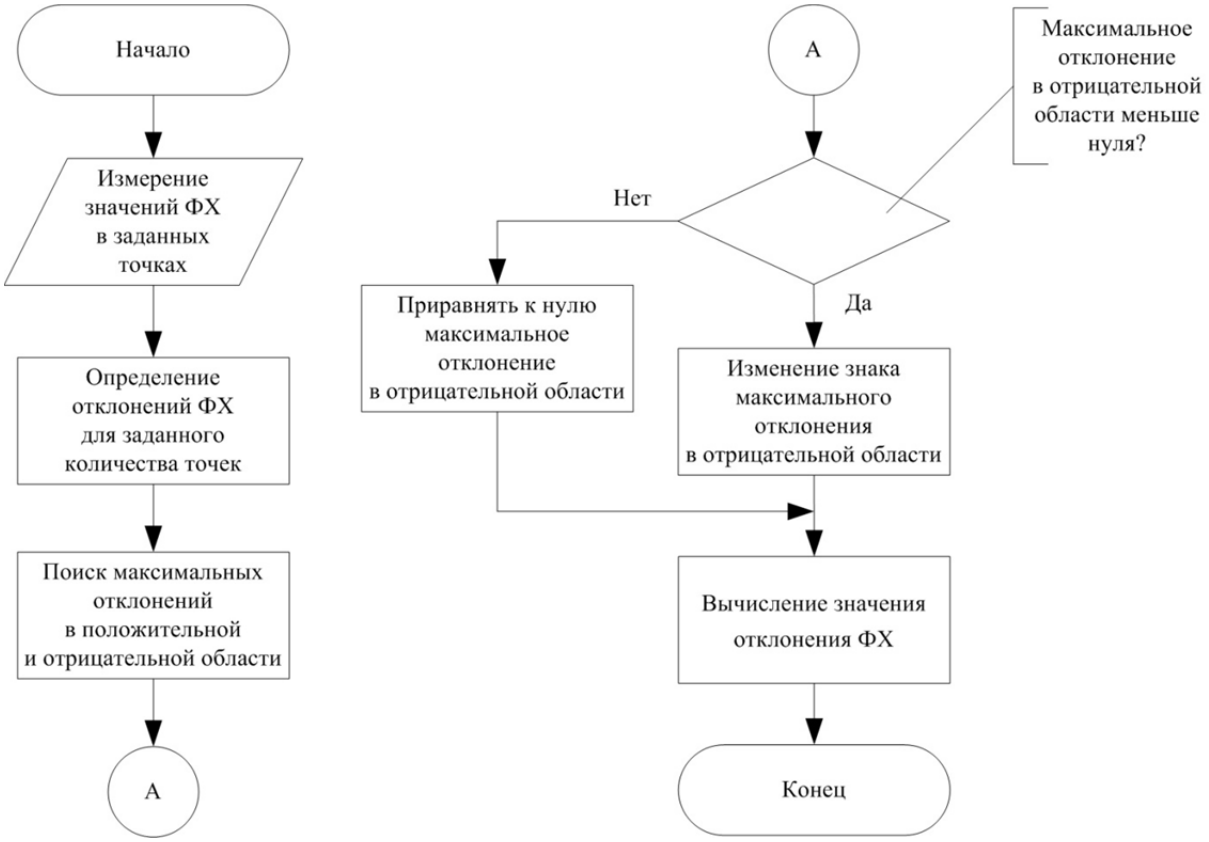


Рис. 5. Алгоритм определения отклонения реальной ФХ от номиальной

Еще одной сложностью при разработке программного обеспечения является определение рабочего угла, который является электрическим углом. В связи с этим определение конечной точки ФХ связано с некоторыми сложностями, вызванными неоднозначностью определения данной точки с помощью стандартных методов.

В результате исследований, проведенных в этой области, был разработан алгоритм, основанный на аффинном преобразовании области ФХ, содержащей конечную точку.

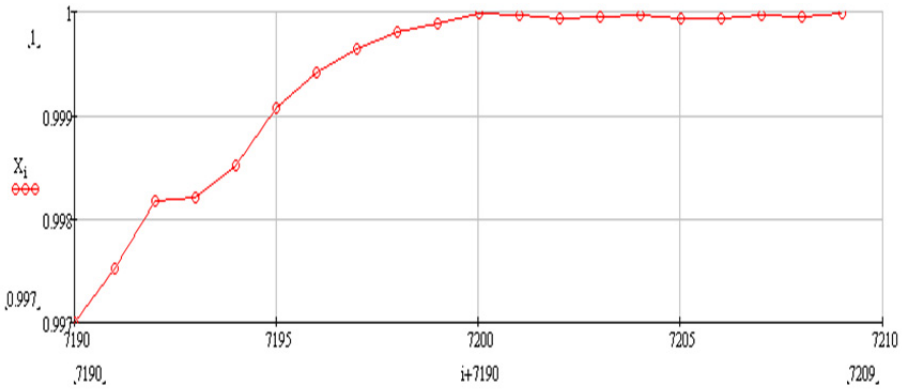
Аффинное преобразование области ФХ, содержащей конечную точку:

$$\frac{X_i - i\dfrac{X_n}{n}}{\sqrt{\left(\dfrac{X_n}{n}\right)^2 + 1}} : X_i \to Y_i,$$

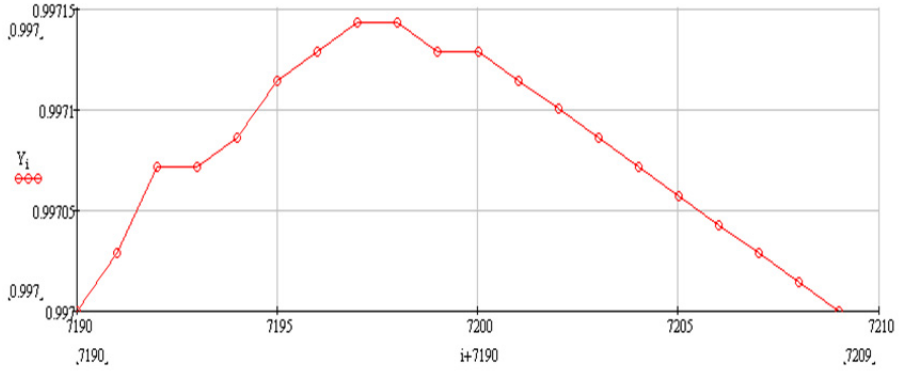
где X_i – точки конечной области ФХ; Y_i – точки конечной области ФХ после аффинного преобразования.

Критерием поиска полученного массива является выражение $\max(Y_i) \to i$, по которому определяется рабочий угол.

Фрагменты ФХ, содержащей конечную точку рабочего угла до аффинного преобразования и после него, представлены на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Фрагменты ФХ, содержащей конечную точку рабочего угла:
а – до преобразования; *б* – после преобразования

Рисунок 6,*б* наглядно характеризует эффективность данного алгоритма, так как конечная точка ФХ, по которой определяется рабочий угол, является экстремумом участка функции.

Таким образом, применение данной информационно-измерительной системы на производстве обеспечило снижение трудоемкости при проведении различных видов испытаний (см. рис. 1), сокращение времени, необходимого на контроль электрических параметров потенциометра, повышение достоверности, а также получение возможности исследования ФХ потенциометров путем сохранения данных на ПК.

Помимо этого, предусмотрена гибкость настройки оборудования под требования испытаний по сравнению с использованием стандартных СИ.

Список литературы

1 Доросинский, А. Ю. Системы контроля параметров прецизионных резисторов / А. Ю. Доросинский, В. И. Андреев, Ю. В. Варламов // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2009. – Т. 2. – С. 71–75.
2 Левин, В. И. Бесконечнозначная логика в задачах кибернетики / В. И. Левин. – М. : Радио и связь, 1982. – 176.
3 Доросинский, А. Ю. Метод оценки монотонности функции преобразования с применением математического аппарата бесконечнозначной логики / А. Ю. Доросинский // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2007. – Т. 1. – С. 281–282.
4 Доросинский, А. Ю. Повышение точности намотки резистивного элемента многооборотного прецизионного потенциометра / А. Ю. Доросинский, В. Д. Зуев // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 2. – С. 158–159.
5 Модуль сопряжения многоканальной виброиспытательной установки с программной средой управления исследованиями / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, Д. А. Голушко // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7).– С. 62–66.
6 Проектирование технических систем с элементами настройки / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2 (6). – С. 51–55.

Доросинский Антон Юрьевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза, ул. Гагарина, 13)
(8412) 42-35-69
E-mail: antik_r13@mail.ru

Недорезов Валерий Григорьевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра сварочного, литейного производства
и материаловедения,
Пензенский государственный университет,
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
(8412) 36-84-53
E-mail: nedval@yandex.ru

Dorosinskiy Anton Yur'evich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technologies
and systems,
Penza State Technological University
(440039, 13 Gagarin street, Penza, Russia)

Nedorezov Valeriy Grigor'evich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of welding, founding manufacture
and materials science,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia),

Аннотация. Рассматриваются проблемы метрологического обеспечения при производстве переменных резисторов. Показана и теоретически обоснована актуальность разработки автоматизированной информационно-измерительной системы, предназначенной для контроля параметров переменных резисторов. Описаны особенности ее разработки. Рассмотрены ключевые вопросы разработки программного обеспечения.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, переменный резистор, функциональная характеристика, рабочий угол, испытание.

Abstract. Problems of metrological support by production of variable resistors are considered. Relevance of development of the automated information measuring system intended for monitoring of parameters of variable resistors is shown and theoretically justified. Features of its development are described. Key questions of software development are considered.

Key words: information-measuring system, a variable resistor, functional characteristics, operating angle, the test.

УДК 004.02
Доросинский, А. Ю.
Информационно-измерительная система контроля параметров переменных резисторов / А. Ю. Доросинский, В. Г. Недорезов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 91–96.

Вниманию авторов!

Редакция научно-практического журнала «Надежность и качество сложных систем» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения по следующей тематике:

Наименование раздела	Коды ГРНТИ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА	28.27.00 Теория надежности. 28.27.15 Оптимизация надежности. 28.27.19 Количественные характеристики. 28.27.27 Методы оценки надежности
НАДЕЖНОСТЬ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	28.27.23 Надежность эргатических систем
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ	47.13.00 Технология и оборудование для электронного и радиотехнического производства. 47.13.17 Технология производства печатных плат. Печатный монтаж. 47.14.17 Проектирование и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. 50.13.00 Технология и оборудование для производства средств автоматики и вычислительной техники
НАДЕЖНОСТЬ СЕТЕЙ СВЯЗИ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ	49.33.35 Надежность сетей связи и защита информации
НАДЕЖНОСТЬ. БЕЗОТКАЗНОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ	55.03.05 Надежность и долговечность машин. 59.03.13 Теория надежности и долговечности приборов. 81.81.07 Надежность. Безотказность, долговечность, ремонтопригодность
ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	59.13.21 Технология и оборудование для испытания и контроля качества приборов. 59.45.71 Узлы, блоки, элементы, детали приборов неразрушающего контроля изделий и материалов
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И БОЕВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ	78.21.53 Исследования и разработки в области эффективности, надежности и боевого использования вооружения и военной техники
МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ	81.81.05 Системы управления качеством. 81.81.17 Методы контроля качества. 81.81.19 Контроль качества на стадиях жизненного цикла продукции. 81.81.21 Контроль качества технологических процессов
СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ И СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА	81.81.26 Сертификация продукции и систем обеспечения качества

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (kipra@pnzgu.ru, дискета 3,5”, CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи – 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt, через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья **обязательно** должна сопровождаться индексом УДК, аннотацией, содержащей 150–200 слов; 7–10 ключевыми словами, а также сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы и должность, ученая степень, ученое звание, адрес, контактные телефоны, e-mail) **на русском и английском языках.**

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версии 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц – прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Надежность и качество сложных систем»** рекомендуем вам оформить подписку.

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс (841-2) 36-84-87, тел.: 36-84-87, 56-47-33; E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку на первое полугодие 2015 г. можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» «Газеты. Журналы», тематический раздел **«Надежность и качество сложных систем»**. Подписной индекс – 43305.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Почта России» ФСП-1

Бланк заказа периодических изданий

АБОНЕМЕНТ На газету / журнал **43305** (индекс издания)

Надежность и качество
(наименование издания)
сложных систем

Количество комплектов

На 20__ год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда _____ (почтовый индекс) _____ (адрес)

Кому _____

Линия отреза

ПВ	место	литер

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА 43305 (индекс издания)

На газету / журнал **Надежность и качество сложных систем** (наименование издания)

Стоимость	подписки	руб.	Количество комплектов	
	каталожная	руб.		
	переадресовки	руб.		

На 20__ год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

			Город
			село
почтовый индекс			область
			Район
код улицы			улица
дом	корпус	квартира	Фамилия И.О.

Редколлегия