

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Михайлов В. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ПОТОКА ОТКАЗОВ.....	3
Лапшин Э. В. ГАРМОНИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ И КУСОЧНО-ЛИНЕЙЧАТАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ЛАГРАНЖА ФУНКЦИЙ МНОГИХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВИАЦИОННЫМ ТРЕНАЖЕРАМ	11
Ишков А. С., Солодимова Г. А., Кучковская Н. А. УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ И КАЧЕСТВОМ ДАТЧИКОВ КАК ИЗДЕЛИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	18
Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. МОДЕЛЬ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ.....	26

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	36
Мишанов Р. О., Пиганов М. Н., Перевертов В. П. ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ.....	43
Дерябин Д. В., Алимova Е. А., Смирнов Г. А., Шульгин А. В., Ольховой А. А. КАЧЕСТВО СЛОЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИКИ МАРОК ВК94, ВК95	55
Семенухин Р. А. ПРОЦЕСС ПРОВОРАЧИВАНИЯ ВКЛАДЫША СФЕРИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА НАКОНЕЧНИКА ДЕМПФЕРА НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА И ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ	61

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Головнин С. М. РИСК ПОТЕРИ НАВЫКА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПИЛОТАМИ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ.....	67
Прокофьев О. В., Савочкин А. Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДАВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ.....	73
Садыхов Г. С. ПЛАНИРОВАНИЕ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	80
Строев В. М., Комбарова И. Н. ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВЫЙ СПЕЦПРОЦЕССОР НА ОСНОВЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КМОП-МАТРИЦ.....	89

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Литвиненко Р. С., Павлов П. П., Аухадеев А. Э. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА ЕГО ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ.....	95
---	----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

Mikhaylov V. S. INVESTIGATION OF INTEGRAL ESTIMATES.....	3
Lapshin E. V. HARMONIC APPROXIMATION AND PIECEWISE-RULED LAGRANGE INTERPOLATION OF FUNCTIONS OF SEVERAL VARIABLES AS APPLIED TO AIRCRAFT EQUIPMENT	11
Ishkov A. S., Solodimova G. A., Kuchkovskaya N. A. CONTROL OF RELIABILITY AND QUALITY OF SENSORS AS PRODUCTS OF RESPONSIBLE APPOINTMENT	18
Vlasov A. I., Grigoryev P. V., Krivoshein A. I. MODEL OF PREDICTIVE EQUIPMENT MAINTENANCE WITH APPLICATION OF WIRELESS TOUCH NETWORKS	26

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

Klyachkin V. N., Karpunina I. N. STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING THE STABILITY OF FUNCTIONING OF TECHNICAL SYSTEMS	36
Mishanov R. O., Piganov M. N., Perevertov V. P. THE CHOICE OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF INTEGRATED CIRCUIT SPECIAL PURPOSE FOR THE INDIVIDUAL FORECASTING OF QUALITY AND RELIABILITY	43
Deryabin D. V., Alimova E. A., Smirnov G. A., Shul'gin A. V., Ol'khovoy A. A. CONTROL OF METALIZATION OF CORUNDUM CERAMICS.....	55
Semenikhin R. L. THE PROCESS OF TURNING THE INSERT WITH THE SPHERICAL BEARING END OF THE DAMPER BEARING SCREW OF THE HELICOPTER AND ITS PREVENTION	61

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Golovnin S. M. THE RISK OF LOSING THE PROBLEM SOLVING SKILLS IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY BY PILOTS CIVIL AVIATION	67
Prokof'ev O. V., Savochkin A. E. MODELING OF THE DETECTION SYSTEM OF PRE-EMERGENCY SITUATION BASED ON THE FUZZY COGNITIVE MAP	73
Sadykhov G. S. PLANNING RESOURCE TEST.....	80
Stroev V. M., Kombarova I. N. DISCRETE ANALOG SPECIAL PROCESSOR ON THE BASIS OF PHOTSENSITIVE CMOS-MATRIXES.....	89

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

Litvinenko R. S., Pavlov P. P., Aukhadeev A. E. EVALUATION OF EFFECT RELIABILITY INFLUENCE ON CROSSING CAPACITY OF GROUND CITY ELECTRIC TRANSPORT	95
--	----

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

УДК 621.382.029.6

DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-1

В. С. Михайлов

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ПОТОКА ОТКАЗОВ

V. S. Mikhaylov

INVESTIGATION OF INTEGRAL ESTIMATES

Аннотация. Целью настоящей работы является построение правила выбора эффективной оценки, основанного на интегральном подходе отличном от 1-го типа, и получение на основе построенного критерия эффективных оценок по результатам испытаний, проводимых в соответствии с планом типа $NB\tau$. **Методы.** Для нахождения эффективной оценки использовались интегральные числовые характеристики точности оценки, а именно: суммарный квадрат смещения (уклонения) ожидаемой реализации некоторого варианта оценки от всех возможных значений оцениваемой характеристики по различным значениям параметра пуассоновского закона распределения, характеризующего поток отказов совокупности испытываемых изделий. **Результаты и выводы.** 1. По результатам испытаний типа $NB\tau$ интегральные оценки 1-го типа используют в задачах, когда требуется найти эффективную оценку с минимальным смещением, а интегральные оценки 2-го типа – когда требуется найти эффективную оценку с минимальной дисперсией. 2. Идеальным вариантом в задачах оценивания является использование несмещенной оценки с минимальной дисперсией, если такая оценка существует. В противном случае следует искать оценки с минимальным смещением, а среди них – с минимальной дисперсией. Такой процесс поиска гарантирует получение оценок с хорошими точностными характеристиками. Поэтому в задачах надежности не следует ориентироваться на оценки, построенные минимизацией функционала 2-го типа. 3. Оценка СНДО T_{01} является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 1-го типа, а

Abstract. The purpose of this paper is to construct a rule for choosing an effective estimate based on an integral approach different from the first type. And, on the basis of the constructed criterion, to obtain effective estimates based on the results of the tests conducted in accordance with the plan of type $NB\tau$. **Methods.** To find an effective estimate, we used the integral numerical characteristics of the accuracy of the estimate, namely, the total square of the displacement (deviation) of the expected realization of a certain valuation variant from all possible values of the estimated characteristic from the different values of the parameter of the Poisson crt characterizing the failure flow of the set of products under test. **Results and conclusions.** 1. According to the results of tests of type $NB\tau$, integral estimates of type 1 are used in problems when it is required to find an effective estimate with minimum displacement, and integral estimates of the second type – when it is required to find an effective estimate with minimal variance. 2. An ideal option, in estimation problems, is to use an unbiased estimate with minimal variance, if such an estimate exists. Otherwise, we should look for estimates with a minimum bias, and among them – with a minimum variance. Such a search process guarantees the obtaining of estimates with good accuracy characteristics. Therefore, in reliability problems, one should not rely on estimates constructed by minimizing a functional of the second type. 3. The evaluation of mean time between failures T_{01} is effective among the 1-type integral estimates proposed by the criterion, and the evaluation of mean time between failures T_{05} is effective among the 2-type integral estimates proposed by the criterion. 4. As an estimate of probability of failure-free operation, a tradi-

оценка СНДО T_{05} является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 2-го типа. 4. В качестве оценки вероятности безотказной работы всегда следует использовать традиционную несмещенную оценку, кроме безотказных испытаний. В этом случае следует использовать смещенную эффективную интегральную оценку ВБР 1-го типа $\hat{\theta}(R, v, g) = e^{\left(\frac{g}{T_{06}}\right)}$ или эффективную смещенную интегральную оценку ВБР 2-го типа $\hat{\theta}(R, v, g) = e^{\left(\frac{g}{T_{07}}\right)}$ в зависимости от задач надежности.

Ключевые слова: Пуассоновский закон распределения; экспоненциальное распределение; план испытаний; точечная оценка.

tional unbiased estimate should always be used, except for fail-safe tests. In this case, an effective integral estimation of the one type $\hat{\theta}(R, v, g) = e^{\left(\frac{g}{T_{06}}\right)}$ or an effective integral estimate of the second type of the reliability function $\hat{\theta}(R, v, g) = e^{\left(\frac{g}{T_{07}}\right)}$ in depending on reliability problems.

Key words: Poisson distribution law; exponential distribution; test plan; point estimation.

Введение

Будем рассматривать пуассоновский поток отказов [1], который возникает при проведении испытаний по плану типа $NB\tau$, где N – число испытываемых однотипных изделий; τ – наработка (одинаковая для каждого изделия); B – характеристика плана, означающая, что работоспособность изделия после каждого отказа в течение срока испытаний восстанавливается [1]. При этом будем считать, что наработка до отказа изделий подчиняется экспоненциальному закону распределения вероятностей (далее – з.р.) с параметром T_0 , где последний совпадает со средней наработкой до отказа (далее – СНДО). Тогда расчетное значение вероятности безотказной работы (далее – ВБР) одного изделия за заданное время τ будет определяться равенством

$$P_0(\tau) = e^{\left(\frac{\tau}{T_0}\right)}. \tag{1}$$

Для плана типа $NB\tau$ достаточной статистикой является число наблюдаемых отказов (r) [1, 2]. Обозначим случайное число отказов через R , тогда для плана испытаний типа $NB\tau$ случайная величина R (далее – с.в.) имеет пуассоновское распределение $L(r; \Delta)$ с параметром $\Delta = N\tau / T_0$ [1, 2]. Тогда по определению r – реализация с.в. R . С другой стороны, R – сумма с.в. X_i , каждая из которых есть случайное число отказов одного из N изделий ($1 < i < N$), поставленных на испытания. X_i имеют пуассоновское распределение с параметром Δ / N :

$$L(r; \Delta) = \sum_{k=0}^{X_1+\dots+X_N=r} e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!}. \tag{2}$$

Интегральный подход в процессе поиска эффективных оценок

Интегральный подход отработан в основном для плана $NB\tau$ [3–5]. В основе интегрального подхода лежит построение правила выбора эффективной оценки $\hat{\theta}_0(R)$, заданного на сумме значений относительных смещений оценки от функции над параметром з.р. $\theta(T_0)$, а именно:

$$b / \theta(t) = \frac{E(\theta(R)) - \theta(t)}{\theta(t)}. \text{ В этом случае самым разумным является построение критерия выбора эффективной оценки на множестве оценок } \hat{\theta}(R, N, \tau), \text{ основанном на суммарном квадрате относительных смещений математического ожидания оценок } E\hat{\theta}(R, N, \tau) \text{ от } \theta(T_0) \text{ для всех возможных значений } T_0, N \text{ и } \tau. \text{ Поэтому в качестве критерия получения эффективной оценки строится функционал (далее – } A(\hat{\theta}))$$

$$A(\hat{\theta}) = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\theta(T_0)} \right)^2 \{E\hat{\theta}(R, N, \tau) - \theta(T_0)\}^2 \partial\Delta, \quad (3)$$

где $\Delta = N\tau / T_0$ – параметр пуассоновского з.р., характеризующий поток отказов [1], $T_0 = \frac{N\tau}{\Delta}$, $b^2 = \{E\hat{\theta}(R, N, \tau) - \theta(T_0)\}^2$.

Воспользовавшись свойствами пуассоновского потока с параметром Δ [1] найдем

$$E\hat{\theta}(R, N, \tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{\theta}(k, N, \tau) e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!}. \quad (4)$$

Эффективная оценка $\hat{\theta}_0(R)$ должна обладать минимальной величиной функционала $A(\hat{\theta}_0)$. Такие эффективные оценки будем называть интегральными оценками. Из определения интегральной оценки следует, что ее выбор основан на минимизации суммы относительных смещений от оцениваемого параметра (или функции от параметра) на всем диапазоне значений, принимаемых этим параметром, и на всем диапазоне значений, которые могут принимать количество испытываемых изделий и время испытаний [6–8].

Таким образом, интегральный подход учитывает все факторы, влияющие на выбор эффективной оценки. Интегральный подход наиболее интересен в случае, когда оценки $\hat{\theta}(R, N, \tau)$ принадлежат к классу смещенных оценок $b^2 > 0$. Эффективные оценки, полученные минимизацией функционала, будем называть интегральными эффективными оценками 1-го типа, так как имеется второй вариант поиска эффективных оценок, использующих интегральный подход.

Отличие байесовской оценки ($\hat{\theta}_o(R)$) от интегральной оценки 1-го типа выражено равенством

$$E(\hat{\theta}_o(R) - \theta(T_0))^2 = D(\hat{\theta}_o(R)) + b = D(\hat{\theta}_o(R)) + E(\hat{\theta}_o(R)) - \theta(T_0).$$

Байесовская оценка $\hat{\theta}_o(R)$ минимизирует среднеквадратическое отклонение за счет минимальной дисперсии, однако во многих случаях можно найти оценку, у которой смещение от параметра (или функции от параметра) меньше. Для задач интегрального оценивания 1-го типа важно не минимальное рассеивание оценок от параметра, а минимальное смещение. Таким образом, байесовские оценки и интегральные оценки 1-го типа решают разные задачи, в основе решения которых лежит одна и та же числовая характеристика точности оценки – среднеквадратическое отклонение.

Определение цели работы

Целью настоящей работы является построение правила выбора эффективной оценки, основанного на интегральном подходе отличном от 1-го типа, и получение на основе построенного критерия эффективных оценок по результатам испытаний, проводимых в соответствии с планом типа $NB\tau$.

Построение правила нахождения эффективных оценок, использующее интегральный подход отличный от 1-го типа

Вторым вариантом поиска эффективных оценок, использующим интегральный подход, является минимизация функционала (далее – $B(\hat{\theta})$), основанного на суммировании математических ожиданий квадратов относительных отклонений оценок $\hat{\theta}(R, N, \tau)$ от $\theta(T_0)$ для всех возможных значений T_0, N и τ , а именно:

$$B(\hat{\theta}) = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\theta(T_0)} \right)^2 E\{\hat{\theta}(R, N, \tau) - \theta(T_0)\}^2 \partial\Delta. \quad (5)$$

Введем обозначения

$$\Delta = \frac{N\tau}{T_0} = n\tau, \quad v = N\tau, \quad T_0 = \frac{v}{\Delta}, \quad N = 1, \tag{6}$$

где v – характеристика объема испытаний, а $N = 1$ – не нарушает общности рассуждений.

Из формулы (6) следует, что в общем случае для множества значений переменной $v \in [v_1; v_2]$ минимизация функционала $B(\hat{\theta}(R, v_i))$, где $v_i \in [v_1; v_2]$, даст множество частных эффективных оценок $\hat{\theta}(R, v_i)$. Чтобы найти общую эффективную оценку, необходимо ее поиск осуществлять минимизацией функционала следующего вида:

$$S(\hat{\theta}(R, v)) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I B(\hat{\theta}(R, v_i)), \tag{7}$$

где δ – шаг суммирования, $I = \frac{v_2 - v_1}{\delta}$ – число шагов суммирования. Так как величина функционала $B(\hat{\theta}(R, v))$ с изменением границ интервала v_1 и v_2 может стремиться как к нулю, так и к бесконечности, то следует ограничиваться рабочим диапазоном объема испытаний. Реальный объем испытаний может колебаться в пределах от 500 до 1000 000 часов, в зависимости от сложности и надежности испытываемого объекта. Именно этот фиксированный интервал следует рассматривать в качестве эталона при вычислении (минимизации) функционала $S(\hat{\theta}(R, v))$.

Для параметрических оценок формулу (7) можно представить в виде

$$S(\hat{\theta}(R, v, g)) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I B(\hat{\theta}(R, v_i, g_j)), \tag{7'}$$

где δ – шаг суммирования, $J = \frac{g_2 - g_1}{\delta}$ – число шагов суммирования, $[g_1; g_2]$ – некоторый отрезок суммирования $g \in [g_1; g_2]$ на числовой оси, который выбирается исходя из задач надежности.

Определение эффективности оценок СНДО для плана испытаний типа NBτ

Будем искать эффективные оценки СНДО на классе смещенных оценок, представимых в виде $\hat{\theta}(R, v) = v\varphi(R)$. Учитывая, что с.в. R распределена в соответствии с пуассоновским з.р., то формулы (5) и (7) переписутся с учетом формул (4) и (11) в виде

$$B(\hat{\theta}) = \int_0^\infty \sum_{k=0}^\infty e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} \{ \Delta\varphi(k) - 1 \}^2 \partial\Delta. \tag{8}$$

Аналогично функционал $A(\hat{\theta})$ (формула (3)) переписется в виде [4]

$$A(\hat{\theta}) = \int_0^\infty \left\{ \sum_{k=0}^\infty e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} \Delta\varphi(k) - 1 \right\}^2 \partial\Delta. \tag{9}$$

В табл. 1 приведены результаты подстановки в функционалы $A(\hat{\theta}(R))$ и $B(\hat{\theta}(R))$ следующих оценок СНДО в соответствии с формулами (8) и (9):

– интегральная эффективная оценка 1-го типа на классе смещенных оценок, представимых в виде $\hat{\theta}(R, v) = v\varphi(R)$, а именно:

$$T_{01} = 2N\tau, \text{ при } r = 0 \text{ и } T_{01} = \frac{N\tau}{r+1}, \text{ при } r > 0;$$

– и оценок, представимых в виде $\hat{\theta}(R, v) = v\varphi(R)$:

$$T_{02} = 2N\tau, \text{ при } r = 0 \text{ и } T_{02} = \frac{N\tau}{r}, \text{ при } r > 0;$$

$$T_{03} = N\tau, \text{ при } r = 0 \text{ и } T_{03} = \frac{N\tau}{r}, \text{ при } r > 0;$$

$$T_{04} = \frac{N\tau}{r+1};$$

$$T_{05} = \frac{N\tau}{r+2}.$$

Таблица 1

Результаты подстановки оценок СНДО в функционалы $A(\hat{\theta}(R))$ и $B(\hat{\theta}(R))$

Вид функционала	T_{01}	T_{02}	T_{03}	T_{04}	T_{05}
$A(\hat{\theta}(R))$ – 1-го типа	0,25	1,44	1,09	0,5	1,37
$B(\hat{\theta}(R))$ – 2-го типа	8,63	12,83	8,83	4,63	3,68

Интегральные оценки 1-го типа (функционал $A(\hat{\theta}(R))$) используют в задачах, когда требуется найти эффективную оценку с минимальным смещением, а интегральные оценки 2-го типа (функционал $B(\hat{\theta}(R))$) – когда требуется найти эффективную оценку с минимальной дисперсией.

Из табл. 1 следует, что оценка СНДО T_{01} является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 1-го типа, а оценка СНДО T_{05} является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 2-го типа. Все предложенные оценки (см. табл. 1) являются смещенными, так как значения функционалов $A(\hat{\theta}(R))$ и $B(\hat{\theta}(R))$ на этих оценках отличны от нуля.

В табл. 2 приведены результаты предложенных оценок СНДО (см. табл. 1) для различных объемов безотказных испытаний и испытаний с одним отказом.

Таблица 2

Результаты предложенных оценок СНДО для различных объемов безотказных испытаний и испытаний с одним отказом

Объем испытаний	T_{01}	T_{02}	T_{03}	T_{04}	T_{05}
$v = 1E + 3, r = 0$	2000	2000	1000	1000	1000
$v = 1E + 4, r = 0$	20 000	20 000	10 000	10 000	10 000
$v = 1E + 5, r = 0$	200 000	200 000	100 000	100 000	100 000
$v = 1E + 6, r = 0$	2 000 000	2 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000
$v = 1E + 7, r = 0$	20 000 000	20 000 000	10 000 000	10 000 000	10 000 000
$v = 1E + 3, r = 1$	500	1000	1000	500	333
$v = 1E + 4, r = 1$	5000	10 000	10 000	5000	3333
$v = 1E + 5, r = 1$	50 000	100 000	100 000	50 000	33 333
$v = 1E + 6, r = 1$	500 000	1 000 000	1 000 000	500 000	333 333
$v = 1E + 7, r = 1$	5 000 000	10 000 000	10 000 000	5 000 000	3 333 333

Из табл. 2 следует, что формула линейной зависимости $\hat{\theta}(R, v) = v\phi(R)$, заложенная в оценки $T_{01} - T_{05}$, линейно (адекватно) корректирует результат в зависимости от объема испытаний. Среди предложенных оценок оценка T_{01} обладает средним разбросом, но с минимальным смещением, а оценка T_{05} обладает минимальным разбросом, но с большим смещением. Так как минимальный разброс величин значений оценки T_{05} не может гарантировать точность результата, то из-за большого смещения оценка T_{05} является менее привлекательной в задачах оценивания СНДО.

В процессе производства испытатель должен самостоятельно делать выбор: либо минимальный разброс с большим смещением, либо минимальное смещение с большим разбросом. В зависимости от выбора принимается решение использовать эффективную интегральную оценку 1-го типа или эффективную интегральную оценку 2-го типа.

Идеальным вариантом в задачах оценивания СНДО является использование несмещенной оценки с минимальной дисперсией, если такая оценка существует. В противном случае следует искать оценки с минимальным смещением, а среди них – с минимальной дисперсией. Такой процесс поиска гарантирует получение оценок с хорошими точностными характеристиками. Поэтому не следует ориентироваться на оценки, построенные минимизацией функционала 2-го типа.

Параметрический случай

Для параметрического случая $\theta(t) = e^{\left(\frac{g}{t}\right)}$, объединяя формулы (7') и (5), получаем

$$S(\hat{\theta}(R, v, g)) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} \left\{ \frac{\hat{\theta}(k, v_i, g_i)}{e^{\left(\frac{g_i \Delta}{v_i}\right)}} - 1 \right\}^2 \partial \Delta. \tag{10}$$

Так как в расчетах по формуле (10) знаменатель $e^{\left(\frac{g_i \Delta}{v_i}\right)}$ может принимать значения близкие к нулю, то функционал всегда имеет величину равную бесконечности, что делает невозможным поиск эффективных оценок. Поэтому в качестве числовой характеристики критерия следует рассматривать не относительное уклонение, а абсолютное. Уберем множитель $\left(\frac{1}{\theta(T_0)}\right)^2$ в формуле (11), тогда формулу (10) можно переписать в виде

$$S(\hat{\theta}(R, v, g)) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} \left\{ \hat{\theta}(k, v_i, g_i) - e^{\left(\frac{g_i \Delta}{v_i}\right)} \right\}^2 \partial \Delta. \tag{11}$$

Аналогично вариант нахождения эффективной оценки минимизацией смещения переписывается в виде [5]

$$D(\hat{\theta}(R, v, g)) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \hat{\theta}(k, v_i, g_i) e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} - e^{\left(\frac{g_i \Delta}{v_i}\right)} \left\{ \right\}^2 \partial \Delta. \tag{12}$$

Будем предполагать, что объем испытаний v варьируется в пределах $1E+03$ до $1E+07$, а $g \in [1E+3; 1E+5]$.

В табл. 3 приведены результаты подстановки в функционалы $S(\hat{\theta}(R, v, g))$ и $D(\hat{\theta}(R, v, g))$ в соответствии с формулами (11) и (12) следующих оценок ВБР для $g \in [1E+3; 1E+5]$ ч:

$$\begin{aligned} - \hat{\theta}(R, v, g) &= e^{\left(\frac{g}{T_{01}}\right)}; \\ - \hat{\theta}(R, v, g) &= e^{\left(\frac{g}{T_{02}}\right)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \hat{\theta}(R, v, g) = e^{(-g/T_{04})}; \\
 & - \hat{\theta}(R, v, g) = e^{(-g/T_{05})}; \\
 & - \hat{\theta}(R, v, g) = e^{\left(\frac{-g}{T_{06}}\right)}, \text{ где } T_{06} = 6NT, \text{ при } r = 0 \text{ и } T_{04} = \frac{NT}{r + 0,5}, \text{ при } r > 0.
 \end{aligned}$$

Таблица 3

Результаты подстановки оценок ВБР, для $g \in [1E + 3; 1E + 5]$ ч, в функционалы $S(\hat{\theta}(R, v, g))$ и $D(\hat{\theta}(R, v, g))$ в соответствии с формулами (11) и (12)

Функционал	$e^{\left(\frac{-g}{T_{01}}\right)}$	$e^{\left(\frac{-g}{T_{02}}\right)}$	$e^{\left(\frac{-g}{T_{04}}\right)}$	$e^{\left(\frac{-g}{T_{05}}\right)}$	$e^{\left(\frac{-g}{T_{06}}\right)}$
$S(\hat{\theta}(R, v, g))$ – 2-го типа	0,095	0,095	0,100	0,149	0,132
$D(\hat{\theta}(R, v, g))$ – 1-го типа	0,038	0,036	0,072	0,135	0,020

Из табл. 3 следует, что оценка ВБР T_{06} является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 1-го типа, а оценка ВБР T_{01} является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 2-го типа.

При вычислениях шаг суммирования по объему испытаний v и величине g производился по степеням с шагом равным единице, а именно: 1E+03, 1E+04, 1E+05, 1E+06, 1E+07.

Заметим, что при вычислениях варьирование шага суммирования приводит к изменению результата функционала, но не меняет сути вещей – результат сравнения оценок не меняется.

В качестве оценки ВБР всегда следует использовать традиционную несмещенную оценку [1], а именно:

$$P(g) = \left(1 - \frac{g}{N\tau}\right)^r, \text{ при } \frac{g}{N\tau} < 1; P(g) = 0, \text{ при } \frac{g}{N\tau} \geq 1, \tag{13}$$

кроме безотказных испытаний. В этом случае следует использовать смещенные эффективные интегральные оценки ВБР 1-го или 2-го типа в зависимости от задач надежности.

Заключение

1. По результатам испытаний типа $NB\tau$ интегральные оценки 1-го типа используют в задачах, когда требуется найти эффективную оценку с минимальным смещением, а интегральные оценки 2-го типа – когда требуется найти эффективную оценку с минимальной дисперсией.

2. Идеальным вариантом в задачах оценивания является использование несмещенной оценки с минимальной дисперсией, если такая оценка существует. В противном случае следует искать оценки с минимальным смещением, а среди них – с минимальной дисперсией. Такой процесс поиска гарантирует получение оценок с хорошими точностными характеристиками. Поэтому в задачах надежности не следует ориентироваться на оценки, построенные минимизацией функционала 2-го типа.

3. Оценка СНДО T_{01} (см. табл. 1) является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 1-го типа, а оценка СНДО T_{05} является эффективной среди предложенных по критерию интегральных оценок 2-го типа.

4. В качестве оценки ВБР всегда следует использовать традиционную несмещенную оценку (формула (13)), кроме безотказных испытаний. В этом случае следует использовать смещенную эффективную интегральную оценку ВБР 1-го типа $\hat{\theta}(R, v, g) = e^{\left(\frac{-g}{T_{06}}\right)}$ или эффективную смещенную интегральную оценку ВБР 2-го типа $\hat{\theta}(R, v, g) = e^{\left(\frac{-g}{T_{01}}\right)}$ в зависимости от задач надежности.

Библиографический список

1. *Гнеденко, Б. В.* Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
2. *Боровков, А. А.* Математическая статистика / А. А. Боровков. – Новосибирск : Наука ; Изд-во Института математики, 1997. – 772 с.
3. *Михайлов, В. С.* Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ / В. С. Михайлов // Надежность и контроль качества. – 1988. – № 9. – С. 6–11.
4. *Михайлов, В. С.* Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ / В. С. Михайлов // Надежность. – 2016. – № 4. – С. 40–42.
5. *Михайлов, В. С.* Оценка вероятности безотказной работы по результатам испытаний, не давших отказы / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 62–66. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-8.
6. *Михеев, М. Ю.* Системы поверки кориолисовых расходомеров / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, В. А. Юрманов, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2012. – № 8. – С. 51–54.
7. *Горячев, Н. В.* Структура автоматизированной лаборатории исследования теплоотводов / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 119–120.
8. *Юрков, Н. К.* К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 220–231.

Михайлов Виктор Сергеевич

ведущий инженер,
Центральный научно-исследовательский институт
химии и механики им. Д. И. Менделеева
(115487, Россия, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а)
E-mail: Mvs1956@list.ru

Mikhailov Viktor Sergeevich

lead engineer,
Central Research Institute of Chemistry
and Mechanics named after D. I. Mendeleev
(115487, 16a Nagatinskaya street, Moscow, Russia)

УДК 621.382.029.6

Михайлов, В. С.

Исследование интегральных оценок потока отказов / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 3–10. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-1.

Э. В. Лапшин

ГАРМОНИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ И КУСОЧНО-ЛИНЕЙЧАТАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ЛАГРАНЖА ФУНКЦИЙ МНОГИХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВИАЦИОННЫМ ТРЕНАЖЕРАМ

E. V. Lapshin

HARMONIC APPROXIMATION AND PIECEWISE-RULED LAGRANGE INTERPOLATION OF FUNCTIONS OF SEVERAL VARIABLES AS APPLIED TO AIRCRAFT EQUIPMENT

Аннотация. Модульное построение технических средств обучения вновь ставит вопрос о проблемно ориентированных вычислительных методах для тренажеров и компьютеризации профессиональной подготовки. Сюда можно отнести варианты методов, излагаемых в статье. Новый метод быстрой кусочно-линейной интерполяции на разряженной равномерной или неравномерной сетке ориентирован на функции многих переменных (до 8–10 и более). Его недостатки с лихвой окупаются вычислительной экономичностью, создающей возможность имитировать важные эффекты, в частности, в критических режимах полета. Метод решения многоэкстремальных многомерных задач позволяет быстро осуществлять сложную параметрическую оптимизацию. Некоторое продвижение достигнуто в задачах синтеза имитаторов физических факторов полета. Для задач моделирования в технических средствах обучения точность исходных массивов данных обычно невысока. Главным достоинством гармонического (спектрального) представления выражения аппроксимирующей функции является возможность формализованного анализа образа (топологии) функции с позиций необходимой детальности описания. Такой формализованный анализ требуется и для применения других более удобных методов аппроксимации (в том числе метода кусочно-линейного интерполирования на разреженной сетке). При этом максимальные ошибки кусочно-линейной интерполяции могут составлять единицы процентов. Дальнейшее обоснование подобных правил задания дискретности сетки будет изложено применительно к кусочно-линейчатой и кусочно-линейной интерполяции функций многих аргументов. Заметим, что тригонометрическая модель аппроксимируемой функции имеет еще одно положительное качество. Ввиду ортогональности базисных функций она удобна для процессов идентификации. При соответствующей информационной технологии идентификации коэффициенты гармоник определяются не по формулам, а непосредственно в ходе получения и обработки экспериментальных данных.

Abstract. Modular technical training once again raises the question of problem oriented computing methods for computerization and training simulators. This could include options for methods outlined in this article. A new method for fast piecewise-linear interpolation to low uniform or non-uniform grid is focused on functions of many variables (up to 8–10). Its shortcomings are more than repaid computational efficiency, creating the ability to imitate important effects, particularly in critical flight modes. Method for solving multiextreme multidimensional tasks enables you to quickly implement complex parametric optimization. Some promotion achieved objectives synthesis of models of physical factors. For modeling tasks in technical means of teaching the accuracy of source arrays of data usually is low (errors are calculated per cent). The main advantage of the harmonic (spectral) represent an expression of the approximating function is the possibility of formalized analysis image (topology) function from the perspective of the necessary detail descriptions. Such formal analysis is required for the use of other more convenient methods of approximation (including piecewise linear interpolation method on sparse grid). When this maximum error of piecewise linear interpolation can be units per cent. Further justification for such rules specify the grid will be given discretion with respect to the piecewise-bar and piecewise linear interpolation functions of many arguments. Note that the trigonometric model of approximation function has another positive quality. In view of the orthogonal basis functions it is useful for the identification process. With the appropriate information technology of identification of coefficients of harmonics are determined not by the equations, and directly in the course of receiving and processing of experimental data.

Ключевые слова: имитаторы авиационных тренажеров, математические модели объектов, кусочно-линейная интерполяция, методы и средства идентификации, метод аппроксимации.

Key words: aviation simulators, simulators and mathematical models of objects, piecewise-linear interpolation, methods and means of identification method of approximation.

Введение

Имеющийся опыт показывает, что, несмотря на высокий уровень развития вычислительной математики, проблемная ориентация в сочетании с аппаратными средствами открывает все новые возможности создания быстрых (экономичных в вычислительном отношении), удобных алгоритмов и информационных технологий. Именно такие новые вычислительные алгоритмы составляют основное содержание статьи.

Гармоническая аппроксимация

Пусть функция $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$, заданная в прямоугольной области

$$-L_j = -N_j \Delta_j \leq x_j \leq L_j = N_j \Delta_j, \quad (j = 1, 2, \dots, r), \tag{1}$$

аппроксимируется суммой Фурье:

$$\tilde{f} = \sum_{v_1, v_2, \dots, v_r} \left\{ a_{v_1, v_2, \dots, v_r} \cos \left[\pi \left(v_1 \frac{x_1}{L_1} + v_2 \frac{x_2}{L_2} + \dots + v_r \frac{x_r}{L_r} \right) \right] + b_{v_1, v_2, \dots, v_r} \sin \left[\pi \left(v_1 \frac{x_1}{L_1} + v_2 \frac{x_2}{L_2} + \dots + v_r \frac{x_r}{L_r} \right) \right] \right\}. \tag{2}$$

Здесь $v_j = 0, 1, \dots, N_j$; $j = 1, 2, \dots, r$; a_{v_1, v_2, \dots, v_r} , b_{v_1, v_2, \dots, v_r} – постоянные коэффициенты.

Эти коэффициенты в принципе могут приближенно определяться посредством дискретного обратного преобразования Фурье:

$$\begin{aligned} a_{v_1, \dots, v_r} &= \frac{2}{N_1 \dots N_r} \sum_{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_r} f(\varepsilon_1 \Delta_1, \dots, \varepsilon_r \Delta_r) \cos \left(\frac{\pi v_1 \varepsilon_1}{N_1} \right) \dots \cos \left(\frac{\pi v_r \varepsilon_r}{N_r} \right), \\ b_{v_1, \dots, v_r} &= \frac{2}{N_1 \dots N_r} \sum_{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_r} f(\varepsilon_1 \Delta_1, \dots, \varepsilon_r \Delta_r) \sin \left(\frac{\pi v_1 \varepsilon_1}{N_1} \right) \dots \sin \left(\frac{\pi v_r \varepsilon_r}{N_r} \right). \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь ε_j – целые числа, изменяющиеся в пределах $-N_j \leq \varepsilon_j \leq N_j - 1$, $j = 1, 2, \dots, r$.

Общее число коэффициентов в выражении (2) равно

$$N_\Sigma = 2 \prod_{j=1}^r (2N_j + 1),$$

т.е. даже больше, чем в выражении $N_\Sigma = (1 + N_1)(1 + N_2) \dots (1 + N_r)$. Однако многими гармониками из этого числа обычно можно пренебречь. Некоторым подтверждением этого является выражение (2) для среднего квадрата функции в области G_Σ (1). Ввиду ортогональности тригонометрических базисных функций среднее значение \tilde{f}^2 равно

$$\overline{\tilde{f}^2} = \frac{1}{2^r L_1 \dots L_r} \int_{G_\Sigma} \tilde{f}^2 dx_1 \dots dx_r = \frac{1}{2} \sum_{v_1, \dots, v_r} (a_{v_1, \dots, v_r}^2 + b_{v_1, \dots, v_r}^2) \tag{4}$$

(в данном случае постоянная составляющая считается отсутствующей).

Для задач моделирования в ТСО точность исходных массивов данных обычно невысока (ошибки исчисляются процентами) и на основе (4) можно предполагать, что коэффициенты, которые на порядок и более меньше остальных, могут быть отброшены.

Главным достоинством гармонического (спектрального) представления (2) аппроксимирующей функции является возможность формализованного анализа образа (топологии) функции с пози-

ций необходимой детальности описания. Такой формализованный анализ требуется и для применения других более удобных методов аппроксимации (в том числе метода кусочно-линейного интерполирования на разреженной сетке, см. ниже).

Таким образом, спектральное представление функций многих аргументов может выступать в роли трудоемкой, но разовой вспомогательной операции на стадии разработки специального программного обеспечения имитаторов ТСО.

Для пояснения обратимся к примерам кусочно-линейной интерполяции синусоидальной и других функций скалярного аргумента.

На рис. 1 приведен график зависимости максимальной ошибки δf_m кусочно-линейной интерполяции синусоидальной функции от величины дискрета (шага сетки) Δ , где L – полупериод аппроксимируемой синусоиды. Видно, что ошибка δf_m , составляющая при $\Delta = 0,5L$ примерно 21 % от максимального значения f , быстро убывает с уменьшением Δ и при $\Delta = 0,125L$ $\delta f_m < 2\%$.

В табл. 1 представлены примеры гармонического приближения функций скалярного аргумента, рассматриваемых как периодические. Здесь же указан характер зависимостей максимальных ошибок кусочно-линейной интерполяции этих функций от величины Δ . Сопоставление скорости убывания амплитуд гармоник с ростом их частоты (номера) и указанной зависимости δf_m от Δ позволяет сформулировать рекомендации по выбору Δ (последний столбец табл.1): при сохранении в аппроксимирующем тригонометрическом полиноме 3-й – 5-й гармоник рекомендуется шаг сетки, равный $1/8$ полного интервала задания интерполируемой функции $\left(\Delta = \frac{\pi}{4}\right)$.

При этом максимальные ошибки кусочно-линейной интерполяции могут составлять первые единицы процентов, но могут и превышать 10 % (см. табл. 1). Дальнейшее обоснование подобных правил задания дискретности сетки будет изложено ниже применительно к кусочно-линейчатой и кусочно-линейной интерполяции функций многих аргументов.

В заключение заметим, что тригонометрическая модель аппроксимируемой функции (2) имеет еще одно положительное качество. Ввиду ортогональности базисных функций она удобна для процессов идентификации [1–7]. При соответствующей информационной технологии идентификации коэффициенты гармоник определяются не по формулам (2), а непосредственно в ходе получения и обработки экспериментальных данных.

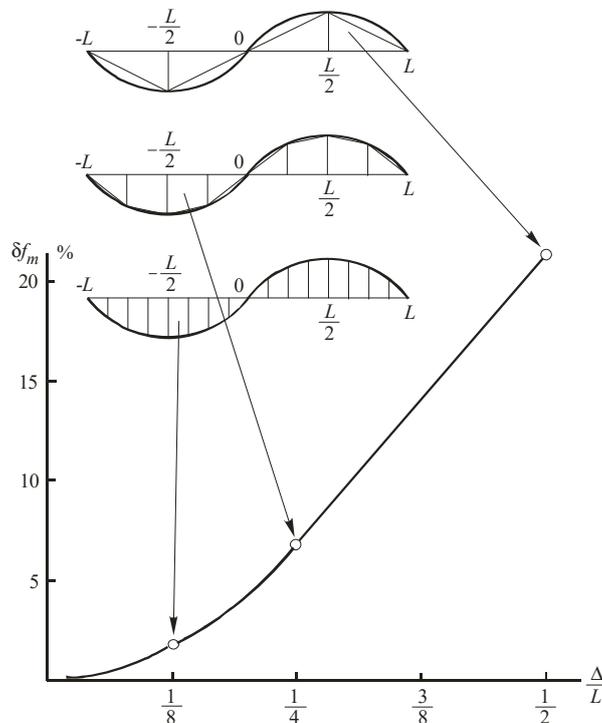


Рис. 1. График зависимости максимальной ошибки δf_m кусочно-линейной интерполяции синусоидальной функции от величины шага сетки Δ

Таблица 1

Примеры гармонического представления функций скалярного аргумента и точности кусочно-линейной интерполяции

	Пример 1	Пример 2
Функция	$f = x$ $-\frac{\pi}{2} < x \leq \frac{\pi}{2}$	$f = x^2$ $-\pi \leq x \leq \pi$
График функции		
Гармоническое представление	$f = \frac{4}{\pi} \left(\sin x - \frac{\sin 3x}{3^2} + \frac{\sin 5x}{5^2} - \dots \right)$	$f = \frac{\pi^2}{3} - 4 \left(\frac{\cos x}{1} - \frac{\cos 2x}{2^2} + \frac{\cos 3x}{3^2} - \dots \right)$
Максимальная ошибка кусочно-линейной интерполяции	$\delta f_m = 0$ при $\Delta = \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{8}, \dots$	
Рекомендуемый шаг сетки	При сохранении 5-й гармоники $\Delta = \frac{\pi}{4}$	При сохранении 5-й гармоники $\Delta = \frac{\pi}{4}$
	Пример 3	Пример 4
Функция	$f = x(\pi - x)$ $0 \leq x \leq \pi$	$f = x^3 - \pi^2 x$ $-\pi \leq x \leq \pi$
График функции		
Гармоническое представление	$f = \frac{8}{\pi} \left(\sin x + \frac{\sin 3x}{3^3} + \frac{\sin 5x}{5^3} + \dots \right)$	$f = -12 \left(\sin x - \frac{\sin 2x}{2^3} + \frac{\sin 3x}{3^3} - \dots \right)$
Максимальная ошибка кусочно-линейной интерполяции		
Рекомендуемый шаг сетки	При сохранении 3-й гармоники $\Delta = \frac{\pi}{4}$	При сохранении 3-й гармоники $\Delta = \frac{\pi}{4}$

Кусочно-линейчатая интерполяция Лагранжа

Кусочно-линейчатая (как и кусочно-линейная) интерполяция функции нескольких аргументов $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ осуществляется обычно на равномерной прямоугольной сетке в пространстве аргументов. Элементарной ячейкой такой сетки служит r -мерный прямоугольный параллелепипед с ребрами длиной $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r$. Эти величины могут выбираться на основе только что описанного подхода, базирующегося на вспомогательном спектральном (гармоническом) представлении интерполируемой функции.

В простейшем варианте гармоническому приближению подлежат r одномерных сечений интерполируемой функции вида $f(x_1, 0, \dots, 0)$, $f(0, x_2, 0, \dots, 0)$, ..., $f(0, 0, \dots, x_r)$. Здесь аргументы x_1, \dots, x_r изменяются в пределах общей прямоугольной области G_Σ (1). Кстати сказать, расширение областей эксплуатационных и предельных режимов (см. выше) до области G_Σ и соответствующее продолжение функции $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ в периферийные части G_Σ должны выполняться так, чтобы не породить фиктивных высокочастотных гармоник и в то же время допускать периодическое продолжение во всем внешнем по отношению к G_Σ пространстве [5, 6].

Для одномерного сечения это поясняет рис. 2. Области эксплуатационных режимов здесь соответствует интервал $a-b$, области предельных режимов – интервал $\delta-e$. Вне интервала $\delta-e$ аппроксимируемая функция не определена (отсутствует исходный массив данных). Между тем в интересах информационной технологии аппроксимации желательно распространить аппроксимируемую функцию на весь интервал $\delta-e$ (G_Σ). Первым способом продолжения служит такой, при котором функция f на интервалах $\delta-e$ и $\delta-v$ считается тождественно равной нулю. Однако при этом на интервале $\delta-e$ функция обычно становится разрывной, что порождает «фиктивные» высокочастотные гармоники [8, 9].

При втором способе на интервалах $\delta-e$, $\delta-v$ функция считается постоянной, равной своим значениям в точках δ и v соответственно (см. рис. 2). При этом способе функция обычно терпит разрывы на границах интервала периодичности, что опять-таки порождает «фиктивные» высокочастотные гармоники.

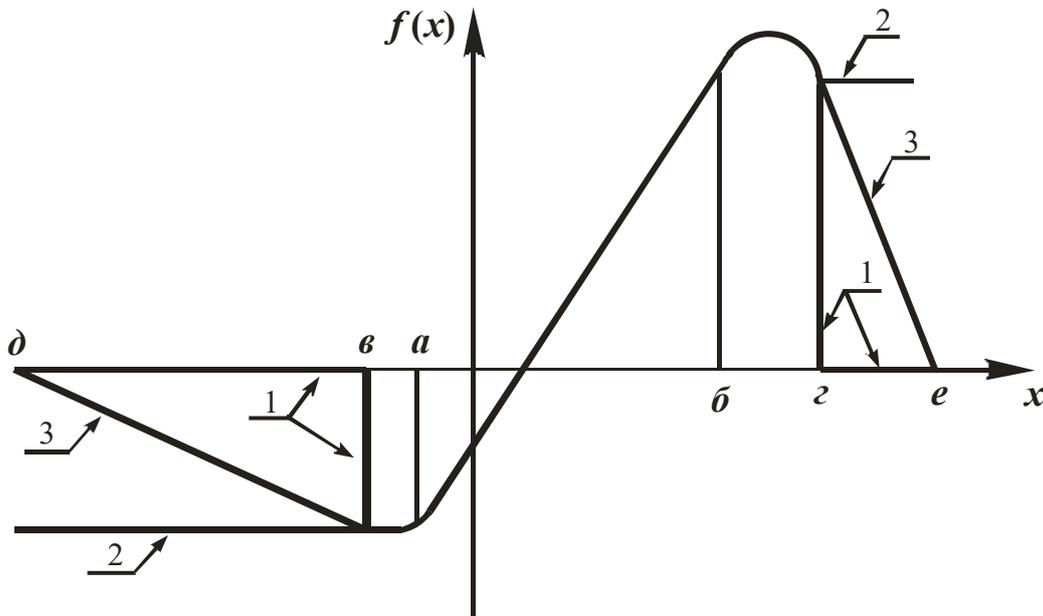


Рис. 2. Гармоническое приближение интерполируемой функции в пределах общей прямоугольной области G_Σ

Третий (рекомендуемый) способ обеспечивает непрерывность аппроксимируемой функции как внутри интервала $\delta-e$, так и на его границах при периодическом продолжении (см. рис. 2).

Возвращаясь к выбору величин $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r$, заметим, что вариант, базирующийся на спектрах одномерных сечений, является очень простым, но несовершенным. Здесь полностью игнорируются все возможные нелинейные перекрестные «связи» функции $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$. При их учете необходимо «полное» представление (2) и отбор состава гармоник согласно выражению (4) или сформулированному выше правилу.

Вершины элементарной ячейки, являющиеся узлами прямоугольной равномерной сетки, имеют координаты

$$\left(i_1 + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\right)\Delta_1, \left(i_2 + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\right)\Delta_2, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\right)\Delta_r, \tag{5}$$

где i_1, i_2, \dots, i_r – целые числа.

Введем индексы q_1, q_2, \dots, q_r , равные последним членам в скобках выражений (5) при конкретной (фиксированной) комбинации знаков. Каждой вершине будет соответствовать одна-единственная комбинация индексов q_1, q_2, \dots, q_r , которую примем за номер вершины в двоичной форме. Всего элементарный параллелепипед имеет 2^r вершин, являющихся одновременно узлами сетки.

Вершине (узлу сетки) $[q_1, q_2, \dots, q_r]$ соответствует значение интерполируемой функции

$$f\left[\left(i_1 + \frac{1}{2} + q_1\right)\Delta_1, \left(i_2 + \frac{1}{2} + q_2\right)\Delta_2, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2} + q_r\right)\Delta_r\right]. \tag{6}$$

Широко известна интерполяционная формула Лагранжа, которую часто именуют формулой кусочно-линейной интерполяции как для одномерного, так и многомерного случаев [2, 8, 9]. В наших обозначениях при равномерной прямоугольной сетке она имеет вид

$$\tilde{f} = \sum_{q_1, \dots, q_r = \pm \frac{1}{2}} (-1)^{\frac{r}{2} \sum_{j=1}^r q_j} \left[\frac{x_1}{\Delta_1} - \left(i_1 + \frac{1}{2} - q_1\right)\right] \dots \left[\frac{x_r}{\Delta_r} - \left(i_r + \frac{1}{2} - q_r\right)\right] \times f\left[\left(i_1 + \frac{1}{2} + q_1\right)\Delta_1, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2} + q_r\right)\Delta_r\right]. \tag{7}$$

Как легко проверить, для всех 2^r вершин элементарного параллелепипеда значения функции \tilde{f} равны значениям интерполируемой функции f и вдоль ребер этого параллелепипеда \tilde{f} является линейной функцией одного аргумента. Однако в целом функция \tilde{f} нелинейная и интерполяцию по выражению (7) целесообразно именовать кусочно-линейчатой. В каждой элементарной ячейке пространства аргументов она соответствует линейчатой поверхности [10, 11].

Значение \tilde{f} в центральной точке элементарного параллелепипеда равно среднему арифметическому значению функции f во всех 2^r вершинах этого параллелепипеда.

Для квадратичной функции

$$f(x_1, \dots, x_r) = f(i_1, \Delta_1, \dots, i_r, \Delta_r) + \sum_{j=1}^r \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)_0 (x_j - i_j \Delta_j) + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^r \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}\right)_0 (x_j - i_j \Delta_j)(x_k - i_k \Delta_k)$$

(индексом «0» обозначены частные производные функции f в вершине $x_1 = i_1 \Delta_1, \dots, x_r = i_r \Delta_r$) ошибка интерполяции в средней точке элементарного параллелепипеда равна

$$\delta = \tilde{f}\left[\left(i_1 + \frac{1}{2}\right)\Delta_1, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2}\right)\Delta_r\right] - f\left[\left(i_1 + \frac{1}{2}\right)\Delta_1, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2}\right)\Delta_r\right] = \frac{1}{8} \sum_{j \neq k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}\right)_0 \Delta_j \Delta_k, \tag{8}$$

где суммирование ведется по всем значениям j, k от 1 до r за исключением значений $j = k$.

Интерполяция по формуле (7) требует задания значений интерполируемой функции во всех узлах рассматриваемой сетки. Число элементарных арифметических операций при однократном вычислении по формуле (7) (без учета операций адресации к памяти) приблизительно составляет $(3r+1)2^r$. При $r=6$ – это 1200, при $r=10$ – 32000.

Заключение

Из изложенного выше следует, что ни один из традиционных методов аппроксимации применительно к многомерным задачам не может рассматриваться как экономичный в вычислительном отношении. Поэтому в тренажерах четвертой и предшествующих базовых конструкций интерполяция характеристик выполнялась и выполняется сугубо приближенно посредством предварительной декомпозиции. При этом функции многих переменных представляются в виде арифметических сумм или сумм произведений функций одной, двух, иногда трех переменных [3, 4, 10]. Интерполяция частных функций при $r \leq 3$ выполняется достаточно просто, в частности, посредством метода Лагранжа.

Такой подход отвечает традиционным формам представления исходной информации в виде семейств графиков или таблиц с одним, двумя или тремя входами.

Вычислительные затраты, необходимый объем памяти здесь ограничены. Однако от проектировщиков требуется поиск удачных эвристических решений, обычно отнимающий много времени. Итоговая точность, как правило, невысока. В целом соответствующая информационная технология не может быть признана современной.

Библиографический список

1. *Богуславский, И. А.* Прикладные задачи фильтрации и управления / И. А. Богуславский. – М. : Наука, 1983.
2. *Красовский, А. А.* Быстрая линейная интерполяция функций многих переменных в системах цифрового моделирования / А. А. Красовский // Доклады Академии наук СССР. – 1989. – Т. 308, № 6. – С. 115–122.
3. *Красовский, А. А.* Авиационные тренажеры / А. А. Красовский, В. И. Лопатин, В. И. Наумов, Ю. Н. Самойлаев. – М. : Изд-во ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1992.
4. *Красовский, А. А.* Математическое моделирование и компьютерные системы обучения и тренажа / А. А. Красовский. – М. : Изд-во ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1989.
5. *Лапшин, Э. В.* Исследование информационных процессов, протекающих в тренажерах / Э. В. Лапшин // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 87–93.
6. *Лапшин, Э. В.* Математическое моделирование динамики полета летательного аппарата : монография / Э. В. Лапшин, А. А. Красовский, Н. К. Юрков ; под ред. Э. В. Лапшина. – Пенза : Изд-во Пенз. филиала РГУ ИТП, 2008. – 260 с.
7. *Кубланов, М. С.* Об адекватности математических моделей и задаче идентификации / М. С. Кубланов // Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Аэромеханика и прочность. – 2009. – № 138. – С. 101–106.
8. *Кубланов, М. С.* Математическое моделирование задач летной эксплуатации воздушных судов на взлете и посадке : монография / М. С. Кубланов. – М. : РИО МГТУ ГА, 2013. – 270 с.
9. *Кубланов, М. С.* Основные принципы математического моделирования динамики полета летательных аппаратов / М. С. Кубланов // Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Аэромеханика и прочность. – 2001. – № 37. – С. 11–15.
10. *Богословский, С. В.* Динамика полета летательных аппаратов : учеб. пособие / С. В. Богословский, А. Д. Дорофеев. – СПб., 2002. – 64 с.
11. *Юрков, Н. К.* К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 220–231.

Лапшин Эдуард Владимирович

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

Lapshin Eduard Vladimirovich

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

УДК 629.7.072.8

Лапшин, Э. В.

Гармоническая аппроксимация и кусочно-линейчатая интерполяция Лагранжа функций многих переменных применительно к авиационным тренажерам / Э. В. Лапшин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 11–17. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-2.

А. С. Ишков, Г. А. Солодимова, Н. А. Кучковская

УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ И КАЧЕСТВОМ ДАТЧИКОВ КАК ИЗДЕЛИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

A. S. Ishkov, G. A. Solodimova, N. A. Kuchkovskaya

CONTROL OF RELIABILITY AND QUALITY OF SENSORS AS PRODUCTS OF RESPONSIBLE APPOINTMENT

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для потребителей датчиков качество продукции является значимым вопросом в связи с негативными последствиями использования некачественных изделий, так как отказ датчика может привести к выходу из строя целого комплекса дорогостоящей высокопроизводительной аппаратуры. Менеджмент надежности предприятия является тем инструментом, который позволяет повысить эффективность координации и контроля всех бизнес-процессов, повысить степень рационального использования всех видов ресурсов и значительно быстрее реагировать на изменения рыночной конъюнктуры. Цель исследования – определение роли менеджмента надежности в формировании качества датчиков. *Материалы и методы.* В работе сделан анализ факторов, влияющих на показатели датчиков на разных стадиях их жизненного цикла. Предложены методы прогнозирования параметров надежности, позволяющие обеспечить регламентируемые показатели качества уже на стадии проектирования датчико-преобразующей аппаратуры. *Результаты.* Применение моделей расчета показателей надежности датчиков, базирующихся на прогнозной информации об однотипных, ранее созданных изделиях, позволит повысить качество и показатели надежности на этапах проектирования датчиков, работающих в экстремальных условиях воздействия на них комплекса влияющих величин. *Выводы.* Внедрение менеджмента надежности в системы управления качеством производственных процессов позволит значительно снизить затраты на разработку и производство датчико-преобразующей аппаратуры.

Ключевые слова: риск, качество, менеджмент, изделия ответственного назначения, прогнозирование.

Abstract. *Background.* For consumers of sensors, the quality of products is a significant issue due to the negative consequences of using substandard products. the sensor failure can lead to the failure of a whole complex of expensive high-performance equipment. Enterprise reliability management is the tool that allows to increase the efficiency of coordination and control of all business processes, to increase the rational use of all types of resources and to react much more quickly to changes in market conditions. The purpose of the study is to determine the role of reliability management in the formation of sensor quality. *Materials and methods.* In work the analysis of the factors influencing indicators of gauges at different stages of their life cycle is made. Methods for predicting reliability parameters are proposed, which make it possible to provide regulated quality indicators already at the design stage of the sensor equipment. *Results.* The use of models for calculating the reliability of sensors based on predictive information about the same type of previously created products will improve the quality and reliability indicators at the design stages of sensors operating under extreme conditions of impact on them of a complex of influencing quantities. *Conclusions.* The introduction of reliability management in the quality management systems of production processes will significantly reduce the cost of developing and manufacturing sensor equipment.

Key words: risk, quality, management, products of responsible design, forecasting.

Введение

К изделиям ответственного назначения принято относить продукцию, предназначенную для эксплуатации на объектах с повышенным уровнем опасности. К таким объектам относятся, прежде всего, комплексы управления атомных электростанций, наземная и бортовая авиационная, морская

и космическая аппаратура, химические производства, оборудование для топливно-энергетического комплекса и т.п. Получение информации о техническом состоянии систем регулирования, диагностики и аварийной защиты составных частей и агрегатов объектов осуществляется с помощью датчиков, неисправность которых может повлечь не только крупные материальные потери, но и многочисленные человеческие жертвы. При этом доступ персонала для калибровки датчиков практически исключен на протяжении всего непрерывного технологического цикла (например, в атомной энергетике) или вообще невозможен в случае пребывания объекта в космическом пространстве.

Анализ методов обеспечения надежности датчиков на разных этапах его жизненного цикла

Современный подход к обеспечению надежности датчиков на требуемом уровне базируется на двух аспектах – механической и метрологической надежности. С одной стороны, датчики являются частью конструкции исследуемых объектов, параметры которых измеряются, с другой стороны, они рассматриваются как преобразователи измерительной информации с нормированными метрологическими характеристиками. На начальных этапах развития датчикоостроения в силу отсутствия требований по механической надежности датчиков в техническом задании (ТЗ) ее оценка проводилась в основном по результатам испытаний. Возрастающие требования к механической надежности датчиков, а также сложность и большой объем испытаний по ее подтверждению привели к необходимости применения расчетной оценки механической надежности путем построения и анализа их структурно-функциональных схем. Однако такая оценка проводилась, как правило, на завершающих этапах разработки датчиков, и в случае несоответствия показателей механической надежности установленным требованиям приводило к необходимости выполнения значительной работы и дополнительным материальным затратам, обусловленным изменением их конструкции. Данные обстоятельства не способствовали поддержанию конкурентоспособности и устойчивого спроса на датчико-преобразующую аппаратуру из-за ее неэффективного проектирования и производства, так как в итоге все эти издержки приводили к значительному увеличению сроков и удорожанию разработки. В общей совокупности различных направлений исследований, связанных с вопросами разработки и применения теории надежности, в настоящее время можно выделить два больших направления.

Первое – развитие и применение математических методов к задачам нахождения и анализа параметров надежности систем и элементов. Здесь используются в основном методы математической статистики и теории вероятности, получившие широкое развитие в последнее время в применении их к теории надежности. Вероятностно-статистические методы в теории надежности рассматриваются в некотором роде как «классика решения задач», а сама теория надежности, построенная на этих методах, относится к «классической». Другое направление характеризуется развитием работ, связанных с изучением физики отказов, процессов (механических, физико-химических, электрических и т.д.), которые приводят к тем или иным изменениям к старению, износу, разрушению материалов, улучшению или ухудшению их свойств.

Характеристики надежности технических изделий, в том числе и датчиков, принято делить на две группы: качественные и количественные. Качественное определение характеризует свойства отдельно взятого изделия. Понятие надежности определяется множеством различных количественных характеристик, поэтому не может быть использовано в полной мере. Но, несмотря на это, чаще стараются использовать количественные характеристики надежности, потому как качественные характеристики нельзя выразить математически. Это привело к необходимости создания новых основных критериев, которые могли бы количественно оценить надежность конкретных элементов и оценить надежность изделий в сравнении между собой. Самые применяемые критерии надежности [1]:

- интенсивность отказов (условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник);
- вероятность безотказной работы (вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет);
- гамма-процентная наработка до отказа (наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью, выраженной в процентах).

Под характеристикой надежности понимают конкретное количественное значение критерия надежности для определенной детали. Данные количественные значения помогают произвести рас-

чет надежности, рассчитать приблизительные сроки службы датчиков, рассчитать предполагаемые сроки ремонта.

Надежность для датчиков – это, прежде всего, свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования в экстремальных условиях эксплуатации. Это качество, простирающееся во времени. Поэтому понятие надежности близко к понятию качества, а потому проблемы управления качеством непосредственно отражаются в представлении о надежности.

Менеджмент надежности как инструмент повышения качества

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт физических измерений» (АО «НИИФИ») – головное предприятие Российского космического агентства, специализирующееся в области создания датчико-преобразующей аппаратуры для измерения давлений, деформаций, сил, перемещений, ускорений и других физических величин, нормализующих преобразователей, систем измерения, диагностики, контроля, управления и аварийной защиты. Основными преимуществами создаваемых приборов и систем являются работоспособность в сложных условиях эксплуатации и долговременная стабильность метрологических характеристик.

В настоящее время в рамках Федеральной космической программы, Государственной программы вооружения, Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» институтом ведутся работы по созданию датчиков с элементами самодиагностики, интеллектуализации процессов приема и обработки информации, расширению функциональных возможностей аппаратуры на основе использования новых конструкционных материалов, критических технологий, микро- и нанотехнологий.

Основными показателями качества датчиков, подтвержденными многолетней практикой их применения в ракетно-космической технике, являются высокая надежность и работоспособность в сложных условиях эксплуатации с сохранением установленных метрологических характеристик. Обеспечение качества продукции осуществляется на этапах разработки, производства, испытаний в соответствии с установленными процессами системы менеджмента качества. Большинство разработок, изготовление и приемка продукции производится с участием Военного представительства.

Эффективным и доступным средством, позволяющим повысить качество датчиков и тем самым достичь цели в сфере надежности, является разработка и применение на предприятии концепции менеджмента надежности [2]. Концепция описывает общие процессы системы менеджмента надежности и предназначена для стратегического управления политикой в области качества и координации деятельности по обеспечению надежности датчиков, повышению их эффективности и улучшению финансовых результатов деятельности предприятия. Система менеджмента надежности должна включать программу по достижению целей в сфере надежности изделий, обеспечению ресурсами для выполнения данных задач, мониторинг, анализ результатов деятельности и ее координацию с точки зрения удовлетворения потребности и ожиданий потребителей.

В программе обеспечения надежности выполняется идентификация критических факторов, ответственных за выполнение задач по обеспечению надежности датчиков, формируется стратегический план, устанавливающий задачи, методы, последовательность действий по выполнению целей в области надежности, критерии для измерения результативности деятельности. Задачи программы надежности должны поддерживаться в рабочем состоянии, инфраструктура менеджмента должна поддерживать связь с потребителем, быть гибкой и адаптированной к возможным изменениям.

Базовыми факторами, составляющими необходимую основу для изготовления качественных изделий с заданными показателями надежности, являются материальная база предприятия (основные средства, материалы и комплектующие, средства измерений, технологическое и испытательное оборудование, методическое обеспечение) и квалифицированный персонал (человеческий фактор).

Датчик проходит ряд стадий своего жизненного цикла. Каждая из стадий, начиная от проектирования и до демонтажа и утилизации, обычно сопровождается измерениями ряда характеристик изделия, используемыми для оценки обеспечения их требуемого качества. Следует уделить особое внимание основным техническим факторам, влияющим на качество технологического процесса изготовления датчиков, к ним относятся: состояние технической документации, степень оснащенности и автоматизации технологического и испытательного оборудования, а также средств измерения, контроль качества материалов, сырья и комплектующих изделий (рис. 1).

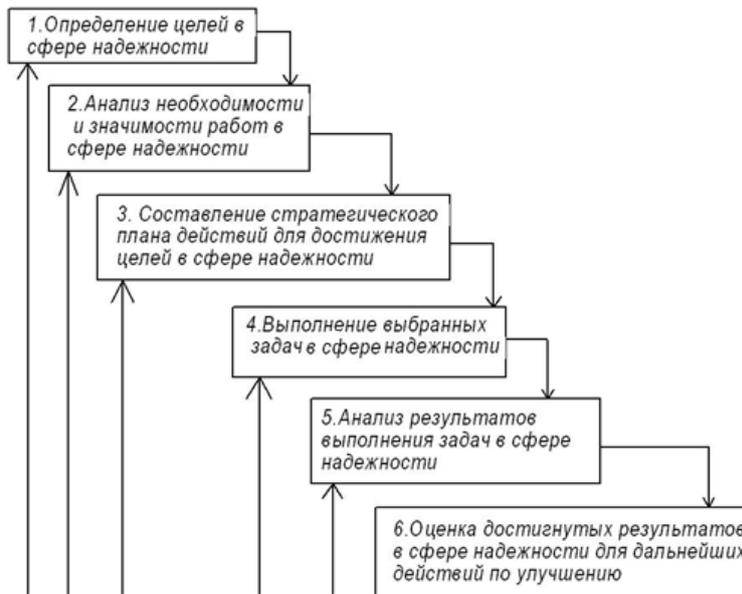


Рис. 1. Этапы процесса менеджмента надежности

Одним из ключевых компонентов в системе менеджмента надежности является инвестирование ресурсов в обновление приборного парка, технологической оснастки, испытательного оборудования, используемого при решении задач программы надежности, своевременное инициирование внедрения инноваций при изготовлении частей, узлов, наиболее ответственных за достижение назначенных функциональных, физических, качественных характеристик готового изделия [3].

В условиях жесткой финансовой экономии для повышения надежности и качества изделий следует не только концентрировать усилия на недопущении отгрузки потребителю брака путем обеспечения служб ОТК различными автоматизированными средствами и сортировкой готовой продукции, а обеспечивать качество изделий технологией его производства и ориентироваться на предотвращение возможности допущения дефектов. Система менеджмента надежности предполагает разработку и внедрение системы контроля дефектов, которая направлена на выявление скрытых дефектов датчиков, ускоряя наступление его отказа путем ужесточения испытательных режимов, использованием систем сбора данных, использующих соответствующие методики и аналитические алгоритмы алгоритмов обработки данных. Такие методики и алгоритмы должны быть основаны на анализе потенциальных причин отказа датчиков, факторов их вызывающих, а также эффективных и доступных способах их выявления.

Внедрение системы контроля дефектов позволяет сформировать своевременные эффективные предупредительные действия для устранения их повторного появления, произвести модификацию изделия и внести усовершенствования в технологический процесс его производства для уменьшения рисков и финансовых потерь, связанных с выводом из эксплуатации изделия.

Для достижения установленных законодательством или контрактным соглашением требований надежности необходимым процессом менеджмента надежности является установление критичных параметров комплектующих и материалов, разработка методик и технологии их контроля, а также установление соответствующих требований перед поставщиками. Перед заключением договоров на поставку требуется привести выбор и квалификацию поставщиков на основе анализа их производственных процессов и гарантийных обязательств.

Анализ результатов выполнения программы надежности может быть выполнен на основе экспериментальных или аналитических оценок показателей надежности датчиков.

Прогнозирование надежности датчиков

По мнению авторов, эффективным способом достижения высокой надежности является прогнозирование показателей надежности изделий на ранних стадиях их жизненного цикла. Моделирование изменения критичных параметров изделий в нормальных и ужесточенных рабочих условиях и режимах эксплуатации обеспечивает аналитический подход к определению показателей надежно-

сти. Такой подход позволяет при максимальном использовании доступных ресурсов гарантировать своевременное выполнение требований надежности при выполнении долгосрочных проектов. Методики и алгоритмы прогнозирования должны быть корректными, основанными на экспериментальных данных испытаний изделий, аналогов, технических моделей и образцов, и учитывать влияние условий эксплуатации ИЭТ, рабочие нагрузки [4].

Традиционно оценка вероятности безотказной работы проектируемых датчиков проводилась, исходя из условия удовлетворения требованию

$$P_p \geq P_3,$$

где P_p и P_3 – соответственно расчетное и заданное значения вероятности безотказной работы датчика.

При этом в силу затрудненности или значительной погрешности расчета отдельных элементов или узлов датчика при ее проектной оценке использовалось среднее значение коэффициента вариации, найденного по результатам экспериментального исследования и статистической обработки определенного массива информации.

В настоящее время широкое применение высокопроизводительной вычислительной техники позволяет использовать методы оценки показателей надежности на основе формализованных описаний и моделей. Это дало возможность использовать эмпирические зависимости показателей надежности изделий от режима эксплуатации датчиков. Эти зависимости положены в основу так называемых ускоренных испытаний на надежность, в основе которых лежат модели, описывающие изменения во времени электрических параметров датчиков. Ускоренные испытания базируются на применении форсированных режимов и использовании теории прогнозирования. Форсированные испытания основаны на интенсификации деградационных процессов, приводящих к отказу испытуемого датчика.

Для оценки показателей надежности датчиков можно использовать два способа [5]. Первый способ основан на изучении физико-химических процессов, происходящих в исследуемом датчике. В данном случае текущее состояние изделия описывается уравнениями, отражающими физические закономерности его старения.

Второй способ основан на изучении статистических, вероятностных закономерностей поведения критериев годности датчика и требует больших объемов накопленной статистической информации по результатам испытаний. Очевидно, что на современном уровне развития электронной техники методы оценки показателей надежности датчиков должны сочетать статистические методы исследования с изучением физических закономерностей, изменения свойств и параметров изделий, описания кинетики процессов, вызывающих эти изменения.

Применение моделей, описывающих физико-химические процессы датчиков, дает возможность разработать научно обоснованные методы ускоренных испытаний и методики прогнозирования значений показателей надежности, что позволит сократить объем и продолжительность необходимых дорогостоящих испытаний на надежность.

При использовании статистических методов делается допущение, что при наличии установившейся технологии или установившегося производства полученная один раз эмпирическая зависимость между количественными показателями надежности и количественными характеристиками внешних воздействий сохраняется, позволяя производить ускоренным методом контроль надежности партий изделий.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что если в расчете используется информация по результатам испытаний изделий, характер отказа которых связан с естественным «старением» материалов, то полученные результаты достаточно объективно отражают работоспособность потенциометров в течение длительного времени [5]. Если же отказы датчиков связаны с нарушением технологического процесса, то значения показателей надежности оказываются значительно заниженными.

При использовании методов, базирующихся на анализе физико-химических процессов, вид зависимости между количественными показателями надежности и количественными характеристиками внешних воздействий определяется аналитическим путем на основе рассмотрения принятой модели влияния физико-химических процессов на надежность датчиков.

Корректность результатов расчета определяется тем, насколько принятая модель соответствует действительной картине физико-химических процессов в изделии. Чтобы объективно осуществ-

Для прогнозирования показателей надежности датчиков, необходимо изучить эти процессы и количественно описать их для каждого вида датчика.

Вероятностно-физические методы оценки показателей надежности датчиков используют тогда, когда по результатам предварительных исследований процесс деградации можно аппроксимировать непрерывным марковским процессом диффузионного типа, т.е. изучаемый процесс управляется стохастическим дифференциальным уравнением первого порядка [6]:

$$dx(t) = A(t)dt + B(t)d\eta(t),$$

где $x(t)$ – определяющий параметр; $A(t)$, $B(t)$ – детерминированные функции, характеризующие изменение среднего значения и дисперсии определяющего параметра (коэффициенты определяющего параметра); $\eta(t)$ – случайная составляющая гауссовского типа.

Известно, что любое твердое тело не является равновесным из-за наличия в нем различного рода дефектов, неравновесных фаз, дислокаций, градиентов концентраций основных компонентов и примесей [3]. Под влиянием электрической нагрузки в датчике образуются тепловые и электрические поля, вызывающие электрокинетические, термоэлектрические, термодиффузионные и другие эффекты. Течение физико-химических процессов приводит к изменению электрических параметров датчиков. При электрической нагрузке в материале элементов датчика возникают дополнительные поля и физико-химические процессы, основными из которых являются:

- искажение теплового поля (неравномерность нагрева) и связанные с ним термомеханические напряжения;
- искажение электрического поля и возникновение градиента полей, создающего локальные перегревы;
- электролиз, ионизация и другие процессы, протекающие в локальных областях.

Например, изменение электрического сопротивления датчика во времени обусловлено процессами окисления, диффузии и реакциями в твердых телах. Во всех случаях скорость протекания в материале датчика физических и химических процессов является функцией температуры материала и имеет температурную зависимость, определяемую законом Аррениуса [7]:

$$\tau^{-1} = v_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right),$$

где v_0 – частотный множитель; E_a – энергия активации; τ^{-1} – скорость релаксации; k – постоянная Больцмана.

Такая форма записи для скорости релаксации возникает тогда, когда процесс, лимитирующий скорость релаксации, связан с движением через энергетический барьер.

При наложении электрического поля E начинается направленный перенос вещества, и высота потенциального барьера изменяется от направления поля.

В процессе эксплуатации в материалах, использованных для изготовления датчиков, происходят различные физико-химические процессы, которые могут привести к значительным отклонениям параметров датчиков от их номинального значения. При прохождении электрического тока через датчик выделяется тепло. Количество тепла, выделяющегося в единицу времени, определяется законом Джоуля – Ленца. По объему материала датчика в стационарном режиме устанавливается некоторое распределение температур, определяемое конструкцией изделия и током, протекающим через него. Любой процесс, приводящий к изменению структуры и состава, определяется перемещением атомов и ионов, т.е. диффузией. Скорость диффузии определяется коэффициентом диффузии, который зависит от температуры и энергии активации.

Например, зависимость изменения комплексного сопротивления во времени от температуры, нагрузки и интенсивности ее включения представляется в виде [8]

$$Z = Z_0 e^{\frac{-B}{T}} P^\beta (1 + \alpha f) f(\tau),$$

где Z – относительное изменение сопротивления (критерий годности); Z_0 – коэффициент, имеющий размерность параметра-критерия годности; B – энергетический коэффициент, характеризуемый энергией активации датчика; T – температура; P – электрическая нагрузка; f – интенсивность включения; α – коэффициент цикличности; $f(\tau)$ – параметр времени.

Современные методы форсированных ускоренных испытаний основаны на увеличении скорости протекания физико-химических процессов, возникающих при изменении окружающих условий, режимов работы и влияющих на свойства и характеристики материалов [9].

Изменения вида отказов с течением времени и в зависимости от величины воздействия ограничивают возможности ускоренных испытаний. Допустимый предел увеличения воздействующей величины ограничивается таким ее значением, при котором возникают новые процессы, отличные от процессов, наблюдаемых при номинальных условиях работы. Рекомендуется для ускорения процессов, приводящих к отказам электрических элементов, увеличивать температуру и электрическую нагрузку [3].

При экстраполяции результатов ускоренных испытаний к другой температуре принимаются следующие допущения: совокупность нескольких реакций рассматривается как одна, уравнение Аррениуса используется для определения энергии активации. Теоретическая зависимость максимально возможного коэффициента ускорения (k_y) от величины энергии активации, полученная на основании закона Аррениуса, имеет вид [8]

$$k_y = \exp \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_\phi} \right),$$

где T_n – температура датчика в нормальных условиях; T_ϕ – температура датчика при фактической температуре испытаний на надежность.

Ускоренные испытания на надежность в форсированных режимах позволяют оценивать надежность датчико-преобразующей аппаратуры на ранних стадиях его жизненного цикла [10].

Заключение

Таким образом, основными путями обеспечения и повышения надежности датчико-преобразующей аппаратуры является эффективный менеджмент надежности, основанный на:

- 1) управлении поставками материалов, сырья и комплектующих с улучшенными свойствами и техническими характеристиками и организации их входного контроля;
- 2) разработке методологии анализа возможных дефектов датчиков, способов и методов их выявления;
- 3) проведении мероприятий по улучшению технологии изготовления изделий путем научно обоснованного выбора контрольных процедур и соблюдения всех требований технологического процесса изготовления изделий;
- 4) повышении эффективности испытаний с помощью автоматизированных информационно-измерительных систем проведения испытаний с аппаратным обеспечением, обладающим высокими метрологическими характеристиками и возможностью создания реальных условий эксплуатации;
- 5) разработке алгоритмов и методик обработки данных результатов испытаний на основе анализа физических процессов, приводящих к отказам и статистических методов оценки показателей надежности, позволяющих выполнять прогнозирование показателей надежности датчиков на ранних стадиях их жизненного цикла (на стадии проектирования и промышленного освоения).

Библиографический список

1. *Ишков, А. С.* Менеджмент надежности как инструмент управления качеством изделий электронной техники / А. С. Ишков, Г. А. Солодимова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 328–330.
2. *Ишков, А. С.* Методика расчета гамма-процентной наработки и интенсивности отказов резистивных датчиков положения управляющих систем / А. С. Ишков, А. И. Цыганков // Надежность. – 2017. – № 1. – С. 22–26.
3. *Леваков, А. А.* Стохастические дифференциальные уравнения / А. А. Леваков. – Минск : БГУ, 2009. – 231 с.
4. *Перроте, А. И.* Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность / А. И. Перроте. – М. : Советское радио, 1969. – 229 с.
5. *Хауффе, К.* Реакция в твердых телах и на их поверхности / К. Хауффе. – М. : Иностранная литература, 1962. – 415 с.
6. *Чернышев, А. А.* Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем / А. А. Чернышев. – М. : Радио и связь, 1988. – 256 с.

7. Некрасов, М. М. Неразрушающие методы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры / М. М. Некрасов, В. В. Платонов, Л. И. Дадео. – Киев : Техника, 1980. – 199 с.
8. Klyuev, M. V. Measurement of the parameters of three-element nonresonant dipoles with two reactive elements / M. V. Klyuev, E. V. Isaev, N. K. Yurkov // Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 60, № 9. – P. 934–938. – DOI 10.1007/s11018-017-1296-y.
9. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. A. Ostreikovskiy, Ye. N. Shevchenko, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 944 (1), № 012085. – P. 2167–2172. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
10. Моделирование нестационарных тепловых полей электрорадиоэлементов / В. Б. Алмаметов, А. В. Авдеев, А. В. Затылкин, Г. В. Таньков, Н. К. Юрков, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2010. – Т. 2. – С. 446–449.

Ишков Антон Сергеевич

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

Солодимова Галина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: solodimova@mail.ru

Кучковская Надежда Александровна

инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений;
магистрант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: fina-larisa@yandex.ru

Ishkov Anton Sergeevich

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

Solodimova Galina Anatol'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information-measuring
technique and metrology,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kuchkovskaya Nadezhda Aleksandrovna

engineer,
Scientific-research Institute of Physical Measurements;
master degree student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.51

Ишков, А. С.

Управление надежностью и качеством датчиков как изделий ответственного назначения /
А. С. Ишков, Г. А. Солодимова, Н. А. Кучковская // Надежность и качество сложных систем. – 2018. –
№ 2 (22). – С. 18–25. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-3.

А. И. Власов, П. В. Григорьев, А. И. Кривошеин

МОДЕЛЬ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ¹

A. I. Vlasov, P. V. Grigoryev, A. I. Krivoshein

MODEL OF PREDICTIVE EQUIPMENT MAINTENANCE WITH APPLICATION OF WIRELESS TOUCH NETWORKS

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе основное внимание уделено методам предиктивного обслуживания (обслуживанию по фактическому техническому состоянию). При таком виде обслуживания состояние оборудования контролируется непрерывно или периодически. В зависимости от полученных результатов составляется прогноз технического состояния оборудования и формируются программы технического обслуживания. Системы предиктивного обслуживания способны прогнозировать состояние системы на основе текущего состояния оборудования и определяют необходимые мероприятия по техническому обслуживанию, что на сегодняшний день является актуальным и находит широкое применение в промышленности. Целью работы является разработка обобщенной концепции реализации системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей с радиочастотной идентификацией и оценка эффективности реализации такой системы по комплексной стоимостной модели. При реализации данного подхода вероятность незапланированного выхода системы из эксплуатации сводится к минимуму. Это повышает эффективность обслуживания и производительность системы и снижает затраты на техническое обслуживание. *Материалы и методы.* Для мониторинга текущего фактического состояния промышленных систем с целью предотвращения сбоев предложена модель системы, основанной на беспроводной сети датчиков. Системы предиктивного обслуживания, основанные на беспроводной сети датчиков, в отличие от остальных видов технического обслуживания сохраняют данные, полученные в процессе мониторинга, что позволяет применять прогрессивные методы контроля технического состояния и анализировать данные в реальном масштабе времени, а также делать прогнозы по техническому состоянию оборудования. Предложенная в статье модель предиктивного ремонта основана на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и риски сбоя компонентов. При оценке

Abstract. *Background.* In work the main attention is paid to methods of predictive service (to service on the actual technical condition). At such type of service the condition of the equipment is controlled continuously or periodically. Depending on the received results the forecast of technical condition of the equipment is formed and programs of maintenance are formed. The systems of predictive service are capable to predict a condition of system on the basis of current state of the equipment and define necessary actions for maintenance that is today relevant and finds broad application in the industry. The purpose of work is development of the generalized concept of realization of system of predictive service on the basis of touch networks with radio-frequency identification and assessment of efficiency of realization of such system on complex cost model. At realization of this approach the probability of an unplanned exit of system from operation is minimized. It increases efficiency of service and productivity of system and reduces costs of maintenance. *Materials and methods.* For monitoring of the current actual state of industrial systems for the purpose of prevention of failures the model of the system based on wireless network of sensors is offered. The systems of predictive service based on wireless network of sensors unlike other categories of maintenance, keep the data obtained in the course of monitoring that allows to apply progressive control methods of technical condition and to analyze data in real time and also to do forecasts for technical condition of the equipment. The model of predictive repair offered in article is based on minimization of costs of service, diagnostics and risks of failure of components. At assessment of average time of work it is offered to apply the simplified model in which deterioration in technical condition (change of a diagnostic signal) takes place in a straight line from an initial state to extreme value of technical condition (to the full) of object *i*-go. *Results.* The concept of creation of system of predictive service on the basis of touch networks with radichastotny identification is offered. For assessment of efficiency of predictive ser-

¹ Отдельные результаты получены при поддержке МОН РФ в рамках проекта по Соглашению No.14.579.21.0142 UID RFMEFI57917X0142.

среднего времени работы предлагается применять упрощенную модель, в которой ухудшение технического состояния (изменение диагностического сигнала) проходит по прямой линии от начального состояния до предельного значения технического состояния (до отказа) i -го объекта. *Результаты.* Предложена концепция построения системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей с радиочастотной идентификацией. Для оценки эффективности предиктивного обслуживания предложена стоимостная модель оптимизации предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей, основанная на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и развертывание системы мониторинга оборудования. *Выводы.* Предиктивное обслуживание оборудования направлено на предсказание места и времени вероятного возникновения неполадок, а также на избежание простоя ресурсов и сокращения расходов на обслуживание. Применение беспроводных каналов связи в системе мониторинга позволяет в кратчайшие сроки развернуть сенсорную сеть в независимости от пространственного расположения датчиков. Представленная концепция системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей позволит в режиме реального времени проводить анализ состояния оборудования. Согласно полученным с датчиков сенсорной сети данным формируется программа технического обслуживания оборудования.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, предиктивный ремонт, передача данных, техническое обслуживание, обработка информации, мониторинг технологических процессов, прогнозирование возникновения дефектов.

vice the cost model of optimization of predictive equipment maintenance with application of wireless touch networks based on minimization of costs of service, diagnostics and expansion of system of monitoring of the equipment is offered. *Conclusions.* Predictive equipment maintenance is directed to prediction of the place and time of probable emergence of malfunctions and also to avoidance of idle time of resources and cut in expenditure on service. Application of wireless channels of communication in the system of monitoring allows to develop in the shortest possible time touch network in independence of a spatial arrangement of sensors. The submitted concept of system of predictive service on the basis of touch networks will allow to carry out in real time the analysis of a condition of the equipment. It agrees to the data obtained from sensors of touch network the program of maintenance of the equipment is formed.

Key words: wireless sensor networks, predictive repair, data transmission, maintenance, information processing, monitoring of technological processes, prediction of defects.

Введение

В настоящее время сформировалось несколько методов обслуживания оборудования, среди которых можно выделить три основных: аварийное, регламентное, предиктивное.

Первый вид – это обслуживание оборудования после выхода его из строя. Данный подход оправдан при обслуживании простого, дешевого оборудования, когда имеется резервирование, и замена будет дешевле, чем ремонтные работы по восстановлению оборудования.

Второй вид обслуживания – планово-профилактическое обслуживание оборудования согласно регламенту. В этом случае обслуживание производится в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя через определенные промежутки времени. Работы по обслуживанию оборудования производятся с определенным периодом, который определяется методами статистического анализа и в соответствии с регламентирующими документами период обычно составляет время, в течение которого не менее 98 % оборудования работает без отказов.

При обслуживании по регламенту, казалось бы, не теряется по крайней мере возможность воспользоваться гарантией завода-изготовителя. Но оказывается, что не менее 50 % из числа всех технических обслуживаний по регламенту выполняются без фактической их необходимости (P/PM Technology magazine, 98). Кроме того, для многих типов оборудования обслуживание и ремонт по регламенту не снижают частоту выхода их из строя.

Более того, надежность работы оборудования после технического обслуживания, если обслуживание предусматривает разборку механизма или замену деталей, часто снижается, иногда временно, до момента их приработки, а иногда это снижение надежности обусловлено появлением от-

существовавших до обслуживания дефектов монтажа. Исследования показали, что порядка 70 % дефектов вызвано обслуживанием машин и оборудования (P/PM Technology magazine, Apr 98).

Третий вид обслуживания, который подробно рассматривается в статье – предиктивное [1, 2], также известное как обслуживание по фактическому техническому состоянию. При этом виде обслуживания состояние оборудования контролируется непрерывно или периодически. В зависимости от полученных результатов составляется прогноз технического состояния оборудования и формируются программы технического обслуживания. Системы предиктивного обслуживания способны прогнозировать состояние системы на основе текущего состояния оборудования и определяют необходимые мероприятия по техническому обслуживанию [3]. Таким образом, вероятность незапланированного выхода системы из эксплуатации сводится к минимуму. Это повышает эффективность обслуживания и производительность системы и снижает затраты на техническое обслуживание. Для мониторинга промышленных систем с целью предотвращения сбоев в работе предложена модель системы, основанной на беспроводной сети датчиков [4, 5].

В настоящее время задача построения распределенных систем сбора данных и мониторинга технологических процессов как никогда актуальна в самых различных областях жизнедеятельности человека. В качестве элементов систем, регистрирующих различные данные, используются датчики – средства измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и/или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем [6].

В зависимости от среды передачи сигналов датчики могут быть проводными и беспроводными. Применение проводных систем не всегда эффективно из-за высокой стоимости монтажных и пусконаладочных работ, а также технического обслуживания. Кроме того, в некоторых ситуациях установка проводных датчиков вообще невозможна по технологическим или организационным причинам. Достоинствами беспроводных датчиков являются минимальные ограничения по их размещению, возможность внедрения и модификации сети таких датчиков на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования, надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами [7]. Кроме того, в некоторых ситуациях установка проводных датчиков вообще невозможна по технологическим или организационным причинам. Достоинствами беспроводных датчиков являются минимальные ограничения по их размещению, возможность внедрения и модификации сети таких датчиков на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования, надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами [8].

Системы предиктивного обслуживания, основанные на беспроводной сети датчиков, в отличие от остальных видов технического обслуживания, сохраняют данные, полученные в процессе мониторинга, что позволяет применять прогрессивные методы контроля технического состояния и анализировать данные в реальном масштабе времени, а также делать прогнозы по техническому состоянию оборудования.

Анализ принципов построения беспроводных сенсорных сетей

В течение длительного времени системы с проводными каналами связи обеспечивали надежную среду передачи и высокую скорость при большом сроке службы. Несмотря на многие достоинства, проводные решения вместе с тем имеют ряд ограничений, которые постепенно делают их менее привлекательными по сравнению с беспроводными технологиями. Среди этих ограничений можно выделить следующие:

- пространственное расположение датчиков;
- затраты на обслуживание каналов связи;
- время развертывания проводных сетей.

Эти три главных недостатка проводной передачи объясняют то, что беспроводные сети – сети радиосвязи, очень стремительно набирают силу. Это объясняется удобством их использования, низкой стоимостью и приемлемой пропускной способностью.

При построении беспроводной сенсорной сети необходимо определить протокол передачи данных. Поскольку в зависимости от области применения беспроводной сенсорной сети используется тот или иной протокол или стандарт для взаимодействия с беспроводными датчиками считы-

вающей аппаратуры [9]. В табл. 1 представлено сравнение видов радиочастотного интерфейса для беспроводных меток/датчиков.

Таблица 1

Сравнение видов радиочастотного интерфейса для беспроводных меток/датчиков

Показатели	Bluetooth	Wi-Fi	ZigBee	RFID UHF
Частотный диапазон (РФ)	2,4 ГГц	2,4 ГГц 5 ГГц	2,4 ГГц 868 МГц	868 МГц
Максимальная дальность связи, м	1/10/100 (зависит от класса оборудования)	100	200	50
Скорость передачи данных	721 кбит/с	450/900/1,3 Гбит/с	256 кбит/с	128–620 кбит/сек
Топология сети	Точка-точка Звезда	Точка-точка Звезда	Точка-точка Звезда Дерево Ячеистая	Считыватель-множество меток/датчиков
Длительность автономной работы от батарейного питания при 30-секундном периоде опроса датчиков	0,5 года	60 дней	1,5 года	2–3 года
Одновременное считывание многих меток одновременно	До 20	До 20	До 10	До 300
Программные протоколы взаимодействия с управляющей системой	Стек протоколов Bluetooth	Стек протоколов TCP/IP	Стек протоколов ZigBee	Протокол LLRP (Low Level Reader Protocol)

Сеть беспроводных датчиков состоит из набора пространственно-распределенных интеллектуальных датчиков, предназначенных для контроля физических параметров – вибрации, температуры, деформации, давления и пр. Каждый узел датчика в сети выполняет функцию считывания, обработки и беспроводной передачи данных. Использование технологии микроэлектромеханической системы (МЭМС) предоставляет возможность недорогого производства маломощных мультифункциональных датчиков малого размера и малого веса.

Применение беспроводных датчиков с автономным электропитанием обуславливает необходимость детального рассмотрения принципов их построения, функционального наполнения и используемых схемотехнических решений в соответствии с обобщенной структурной схемой на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема беспроводного датчика

Регистрация контролируемых характеристик осуществляется чувствительным элементом (ЧЭ) датчика. При этом для измерения одной и той же величины могут применяться датчики, использующие различные физические процессы ее преобразования в электрические сигналы и разнообразные принципы действия (рис. 2) [10–12]. Блок обработки предназначен для усиления электрического сигнала и его преобразования к виду, удобному для передачи. Функциональное наполнение блоков обработки зависит от вида выходного сигнала. Следует отметить, что критерии достижения минимального токопотребления противоречат критериям достижения максимального быстродействия, поэтому микромощные ОУ имеют очень скромные скоростные параметры [11, 12].

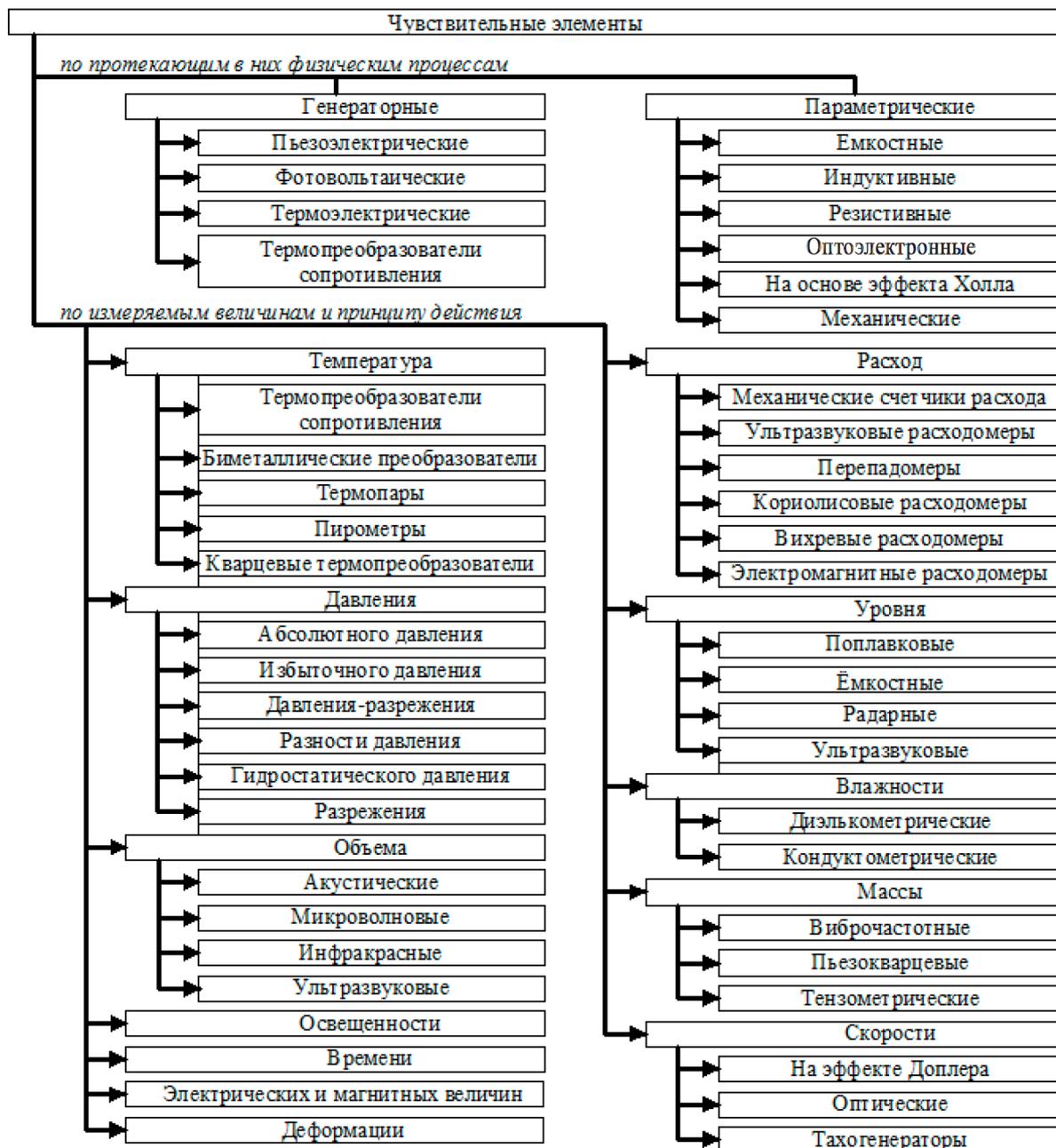


Рис. 2. Типы чувствительных элементов беспроводных датчиков [11, 12]

Согласно данным, представленным в табл. 1, предложено использовать беспроводные сенсорные сети на базе радиочастотной идентификации (RFID) [13], поскольку длительность автономной работы и количество одновременно считываемых меток являются основными параметрами при выборе радиочастотного интерфейса в системах предиктивного обслуживания оборудования.

Концепция системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей

На производственных цепочках для получения данных о состоянии оборудования применяются беспроводные сенсорные сети, которые состоят из различных датчиков, включая инфракрасные датчики, акустические, датчики вибрации, удара и ускорения [11, 12]. На рис. 2 представлена обобщенная схема получения данных и анализа состояния оборудования в режиме реального времени. В процессе работы происходит непрерывный контроль состояния модулей, а также сравнение полученных данных с датчиков с показаниями во время нормальной работы оборудования, для определения возможных неисправностей.

На рис. 2 изображена производственная цепочка (1), на оборудование которой установлены беспроводные сенсорные метки. Отказ от проводных датчиков позволяет расположить сенсоры в труднодоступных местах, тем самым увеличить количество самих датчиков и точность получаемых в процессе мониторинга параметров. Данные с датчиков считываются и передаются по беспроводной сети на внешние сервера, где происходит преобразование, хранение и обработка данных (2).

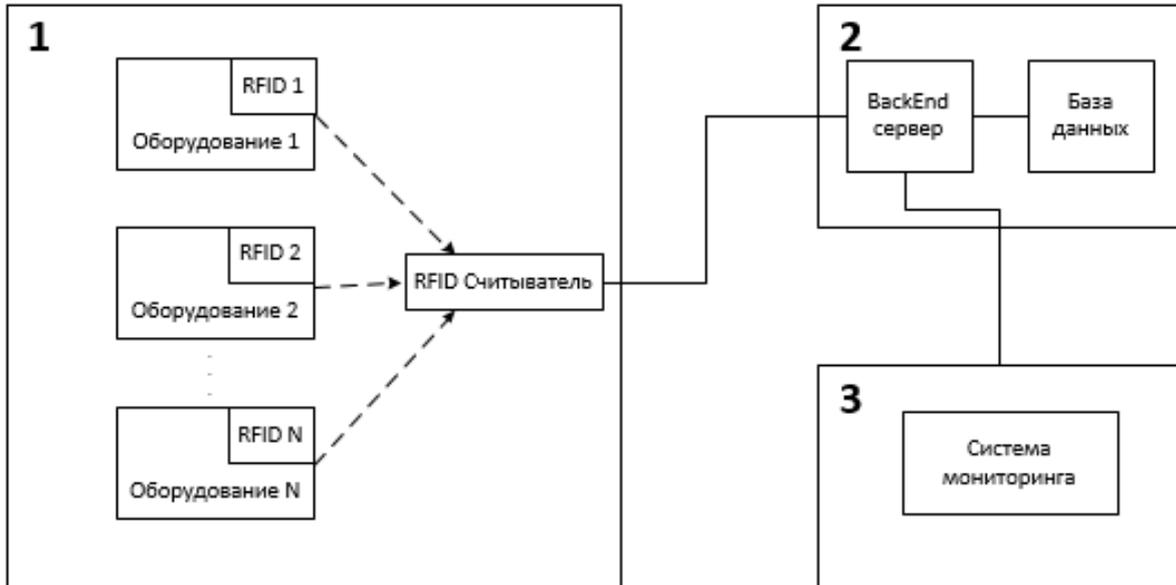


Рис. 3. Анализ состояния оборудования в режиме реального времени

Все полученные с датчиков данные сохраняются в базе данных, расположенной в облаке. Данные необходимы для отображения статистики. Также существует база данных дефектов, которая включает в себя информацию, связанную с дефектами различных устройств, соответствии возникающих дефектов и времени эксплуатации, на котором обычно происходят такие дефекты. Данные, полученные в результате мониторинга, обрабатываются и в дальнейшем сортируются в порядке частоты возникновения. Данный подход позволяет сформировать программу предиктивного обслуживания оборудования, а также спрогнозировать выход из строя каких-либо его частей [13–14].

Сохраненные данные в любой момент времени могут быть получены в виде графиков или же отдельных событий и отображены на экране системы мониторинга компьютера, планшета или мобильного телефона (3).

Стоимостная модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей

Предложенная в статье модель предиктивного ремонта основана на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и риски сбоя $c(S_p)$ компонентов [3, 14]:

$$c(S_p) = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\bar{t}(S_p)} + c_d, \quad (1)$$

где C_{pr} – затраты на предиктивное обслуживание; S_p – значение сигнала, получаемого с датчиков в процессе мониторинга состояния оборудования (является случайной величиной); $F(S_p)$ – функция распределения вероятности отказа в зависимости от сигнала с датчика; L_f – потери из-за рисков сбоя; c_d – единичные затраты на мониторинг состояния оборудования для получения диагностического сигнала; $\bar{t}(S_p)$ – среднее время работы оборудования до выхода из строя, которое определяется по формуле

$$\bar{t}(S_p) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_p)} t_i(S_p) + \sum_{j=1}^{n-m(S_p)} t_j(S_p) \right], \tag{2}$$

где $t_i(S_p)$ – это время работы i -го объекта с нормальным значением сигнала S_p ; $t_j(S_p)$ – это время работы j -го объекта, который вышел из строя до того момента, как диагностический сигнал с датчика достиг состояния S_p ; $m(S_p)$ – количество объектов, достигающих состояния S_p без сбоев; n – общее количество мониторинга.

Для получения среднего значения времени до выхода оборудования из строя необходимо провести испытания, включающие диагностические измерения. При анализе полученных данных необходимо рассчитать среднее время с момента получения сигнала о нестабильной работе оборудования до полного выхода его из строя. В данном случае, применив уравнение (2), можно рассчитать среднее время работы оборудования с момента получения сигнала о нестабильной работе до полного выхода из строя.

При расчете среднего времени работы предлагается применять упрощенную модель, в которой ухудшение технического состояния (изменение диагностического сигнала) проходит по прямой линии от начального состояния S_{pz} до предельного значения технического состояния (до отказа) S_{pfi} i -го объекта. Расчет $t_i(S_p)$ выполняется по формуле

$$t_i(S_p) = t_i(S_{pfi}) \frac{S_{pi} - S_z}{S_{pfi} - S_z}. \tag{3}$$

На рис. 4 представлен графический способ определения входных данных для расчета среднего времени работы оборудования в зависимости от диагностических сигналов с датчиков при предиктивном обслуживании.

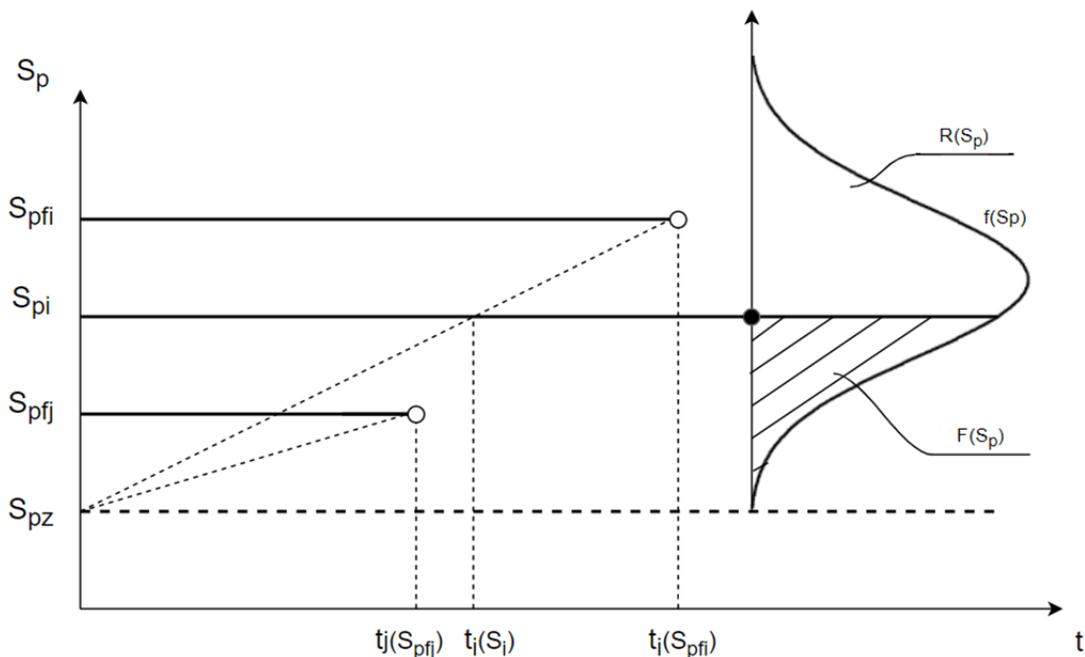


Рис. 4. Графический способ определения входных данных для расчета среднего времени работы оборудования в зависимости от диагностических сигналов с датчиков

К единичным затратам на мониторинг состояния оборудования для получения диагностического сигнала можно отнести затраты на развертывание беспроводной сенсорной сети и обслуживание, может быть описана согласно формуле

$$c_d = l(C_i + C_s) + kC_r. \tag{4}$$

Таким образом, модель оптимизации предиктивного ремонта с применением беспроводных сенсорных сетей, основанная на минимизации затрат на техническое обслуживание оборудования, может быть описана согласно формуле

$$c(S_p) = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\bar{t}(S_p)} + c_d = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_p)} t_i(S_p) + \sum_{j=1}^{n-m(S_p)} t_j(S_p) \right]} + c_d = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_p)} t_i(S_p) + \sum_{j=1}^{n-m(S_p)} t_j(S_p) \right]} + l(C_t + C_s) + kC_r, \quad (5)$$

где C_{pr} – затраты на предиктивное обслуживание; S_p – значение сигнала, получаемого с датчиков в процессе мониторинга состояния оборудования (является случайной величиной); $F(S_p)$ – функция распределения вероятности отказа в зависимости от сигнала с датчика; L_f – потери из-за рисков сбоя; c_d – единичные затраты на мониторинг состояния оборудования для получения диагностического сигнала; $\bar{t}(S_p)$ – среднее время работы оборудования до выхода из строя, которое определяется по формуле (2); l – количество сенсорных меток с датчиками; C_t – стоимость одной сенсорной метки; C_s – стоимость одного датчика; k – количество считывателей; C_r – затраты на приобретение и установку одного ридера [15–17].

Заключение

Предиктивное обслуживание оборудования направлено на предсказание места и времени вероятного возникновения неполадок, а также на избежание простоя ресурсов и сокращения расходов на обслуживание. Применение беспроводных каналов связи в системе мониторинга позволяет в кратчайшие сроки развернуть сенсорную сеть в независимости от пространственного расположения датчиков.

Представленная концепция системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей позволит в режиме реального времени проводить анализ состояния оборудования. Согласно полученным с датчиков сенсорной сети данным формируется программа технического обслуживания оборудования.

Предложена стоимостная модель оптимизации предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей, основанная на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и развертывание системы мониторинга оборудования.

Библиографический список

1. *Rawi Zaid. Machinery Predictive Analytics / Rawi Zaid // SPE Intelligent Energy (March 23–25, Utrecht, Netherlands). – 2010. – DOI <https://doi.org/10.2118/128559-MS>.*
2. *Stone, P. Introducing Predictive Analytics: Opportunities / P. Stone // Digital Energy conference and exhibition (April 11–12, Houston, Texas, USA). – 2007. – DOI <https://doi.org/10.2118/106865-MS>.*
3. *Design Methods of Teaching the Development of Internet of Things Components with Considering Predictive Maintenance on the Basis of Mechatronic Devices / A. I. Vlasov, A. V. Yudin, M. A. Salmina, V. A. Shakhnov, K. A. Usov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, № 20. – P. 9390–9396.*
4. *Власов, А. И. Применение методов и средств радиочастотной идентификации в корпоративных информационных производственных системах / А. И. Власов, П. В. Григорьев, В. П. Жалнин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 272–277.*
5. *Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.*
6. *Козлова, Е. И. Метрологическое обеспечение систем обработки информации : конспект лекций / Е. И. Козлова. – Минск : БГУ, 2009. – 99 с.*
7. *Богданов, С. П. Перспективы и проблемы применения беспроводных датчиков с автономным питанием / С. П. Богданов, О. О. Басов // Доклады ГУСУРа. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 20–23.*

8. Пат. 2556423 Российская Федерация. Способ функционирования беспроводной сенсорной сети / В. А. Шахнов, А. И. Власов, Е. В. Резчикова, С. В. Токарев, И. М. Смурыгин, Н. А. Денисенко, К. А. Муравьев ; опубл. 05.07.2013.
9. *Власов, А. И.* Методы упреждающего прогнозирования состояния широкополосной сети связи / А. И. Власов, В. В. Иванов, И. А. Косолапов // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1. – С. 3–6.
10. Отчет по НИР № 7.6161.2011 Гибридные чувствительные элементы интеллектуальных сенсоров распределенных управляющих систем / под ред. В. А. Шахнова ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2013. – 247 с.
11. *Фрайден, Дж.* Современные датчики : справочник / под ред. Е. Л. Свинцовой ; пер. с англ. Ю. А. Забалотной. – М. : Техносфера, 2005. – 589 с.
12. Датчики : справочник / под ред. З. Ю. Готры, О. И. Чайковского. – Львов : Каменяр, 1995. – 312 с.
13. *Григорьев, П. В.* Оценка потенциального объема рынка систем на базе радиочастотной идентификации и его динамика / П. В. Григорьев, А. И. Власов // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2017. – С. 389–390.
14. *Burduk, A.* Evaluation of the risk in production systems with a parallel reliability structure / A. Burduk, E. Chlebus // *Eksploatacja i Niezawodność -Maintenance and Reliability.* – 2009. – № 2 (42). – P. 84–95.
15. *Горячев, Н. В.* Информационно-измерительный лабораторный комплекс исследования теплоотводов электрорадиоэлементов / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 239–240.
16. *Горячев, Н. В.* Исследование и разработка средств и методик анализа и автоматизированного выбора систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Горячев, М. К. Танатов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 70–75.
17. *Горячев, Н. В.* Типовой маршрут проектирования печатной платы и структура проекта в САПР электроники ALTIUM DESIGN / Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 120–122.

Власов Андрей Игоревич

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

Григорьев Павел Валерьевич

ассистент,
кафедра проектирования и технологии
производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: vlasov@iu4.ru

Кривошеин Алексей Игоревич

магистрант,
кафедра проектирования и технологии
производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: vlasov@iu4.ru

Vlasov Andrey Igorevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of engineering and manufacturing
technology of radio-electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, page 1, 5 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Grigor'ev Pavel Valer'evich

assistant,
sub-department of engineering and manufacturing
technology of radio-electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, page 1, 5 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Krivoshein Aleksey Igorevich

master degree student,
sub-department of engineering and manufacturing
technology of radio-electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University,
(105005, page 1, 5 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

УДК 681.324

Власов, А. И.

Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей / А. И. Власов, П. В. Григорьев, А. И. Кривошеин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 26–35. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-4.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 519.248: 681.518.5

DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-5

В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

V. N. Klyachkin, I. N. Karpunina

STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING THE STABILITY OF FUNCTIONING OF TECHNICAL SYSTEMS

Аннотация. Актуальность и цели. Стабильность функционирования системы часто определяет ее работоспособность. Нарушение стабильности может привести к остановке системы или возникновению аварийной ситуации. Важной задачей является скорейшее обнаружение нарушения стабильности процесса функционирования. **Методы.** Нарушения проявляются в виде изменения статистических характеристик, поэтому для их обнаружения могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля процессов. Такой подход позволяет выявить нарушение до того, как произошел выход контролируемых показателей за допустимые пределы. При этом, как правило, одновременно проводится мониторинг среднего уровня процесса и его рассеяния. Выбираются статистические инструменты для контроля: для независимых показателей используются стандартные карты Шухарта, для коррелированных – методы и алгоритмы, основанные на применении многомерной статистики Хотеллинга и обобщенной дисперсии. **Результаты.** Проведенное исследование позволило предложить следующую методику оценки стабильности функционирования технических

Abstract. Background. Stability of functioning of the system often determines its performance. Instability can lead to system or stop the occurrence of an emergency situation. An important task is the early detection of violations of process stability operations. **Materials and methods.** Violations are manifested in the form of statistical characteristics, therefore, to find them can be used methods and algorithms for statistical process control. Such approach allows to reveal the violation occurred before exit controlled performance limits. Thus, as a rule, simultaneously monitoring and mid-level process and its dispersion. Selected statistical tools for control: for independent indicators used standard Shewhart's charts, for correlated methods and algorithms, based on the use of multivariate Hotelling's statistics and generalized variance. **Results.** This study allowed us to propose the following methodology for assessing the stability of technical systems: a study of working conditions analogical systems and identification of possible disturbances; calculation of basic statistical characteristics of the process; selection of statistical tools for follow-up depending on the alleged violations and the level of correlativeness of parameters; provodenie for continuous monitoring of the functioning

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект №16-48-732002.

систем: изучение условий работы аналогичных систем и выявление возможных нарушений стабильности функционирования; расчет основных статистических характеристик процесса; выбор статистических инструментов для последующего контроля в зависимости от предполагаемых нарушений и уровня коррелированности параметров; проведение постоянного мониторинга функционирования системы с целью диагностики нарушений стабильности. *Выводы.* Предлагаемая методика позволит своевременно обнаружить нарушение стабильности процесса функционирования технического объекта и предотвратить возможную аварийную ситуацию.

Ключевые слова: техническая диагностика, обнаружение нарушений, контрольная карта Шухарта, алгоритм Хотеллинга, обобщенная дисперсия.

of the system for diagnostics of stability. *Conclusions.* The proposed methodology would detect violation of process stability functioning of the technical object and prevent the possible emergency.

Key words: technical diagnostics, detection, Shewhart's control chart, Hotelling's algorithm, generalized variance.

Введение

Постоянный рост сложности технических систем требует разработки новых методов диагностики их состояния. Обеспечение безопасности функционирования технических систем связано с оперативным предотвращением перехода штатных ситуаций в аварийные [1]. Стабильность функционирования системы часто определяет ее работоспособность. Нарушение стабильности может привести к остановке системы или возникновению аварийной ситуации.

Важной задачей является скорейшее обнаружение нарушения стабильности процесса функционирования. Нарушения проявляются в виде изменения статистических характеристик, поэтому для их обнаружения могут быть использованы методы и алгоритмы статистического контроля процессов [2, 3]. Такой подход позволяет выявить нарушение до того, как произошел выход контролируемых показателей за допустимые пределы: при нормальном функционировании системы границы доверительных интервалов этих показателей существенно уже, чем границы допуска. При этом, как правило, одновременно проводится мониторинг среднего уровня процесса и его рассеяния.

Критерии стабильности процессов функционирования различны для технических систем разного назначения. Для системы водоочистки, например, основным показателем является качество очистки питьевой воды. В исследованной системе Санкт-Петербургского водоканала, например, контролируется восемь физико-химических показателей: мутность, цветность, содержание алюминия, хлоридов, остаточного хлора, значение pH, окисляемость и щелочность [4], таким образом, речь идет о диагностике многопараметрического процесса.

Стабильное функционирование гидроагрегата связано с обеспечением множества критериев, в частности, с уровнем вибраций [5], опять-таки вибромониторинг проводится с помощью множества датчиков вибраций. Запись вибраций проводилась в системе управления гидроагрегатом на Краснодарской ГЭС (Краснодарский край), контролировались биение вала и вибрация гидроагрегата. Процесс определяется десятью показателями.

Температурный режим компьютера также является лишь одним из критериев нормальной работы вычислительной системы. Исследование стабильности температурного режима проводилось по пяти факторам [6]: температурам центрального процессора, двух ядер, графического видеопроцессора и видеокарты.

Для разработки методики оценки стабильности функционирования технической системы проводится предварительный анализ результатов мониторинга, желательно в условиях нормального функционирования исследуемого объекта. При этом определяется уровень коррелированности показателей (с учетом значимости) и производится разбивка их на группы независимых и коррелированных [7, 8]. Выбираются статистические инструменты для контроля: для независимых показателей используются стандартные карты Шухарта [9, 10], для коррелированных – методы и алгоритмы, основанные на применении многомерной статистики Хотеллинга и обобщенной дисперсии [3, 11, 12].

Оценка стабильности независимых показателей

Для контроля стабильности некоррелированных показателей могут быть использованы карты Шухарта, например, для среднего уровня и стандартного отклонения [9, 10]. На карте средних значений откладывается среднее значение показателя контролируемого показателя X в t -й выборке ($t = 1, \dots, m, m$ – количество выборок):

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ti}, \tag{1}$$

(x_{ti} – результат i -го наблюдения в t -й мгновенной выборке объема n), которое и откладывается на карте. Положение центральной линии определяется по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \bar{x}_t = \frac{1}{nm} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ti}. \tag{2}$$

Для оценки рассеяния вычисляется несмещенная дисперсия каждой мгновенной выборки:

$$s_t^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ti} - \bar{x}_t)^2; \tag{3}$$

$$\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m s_t. \tag{4}$$

Положение контрольных границ карты средних значений – верхней UCL и нижней LCL – определяется по формулам

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = \bar{x} \pm A_3 \bar{s} \tag{5}$$

(A_3 – коэффициент, определяемый по таблице [9] в зависимости от объема выборки n).

На карте стандартных отклонений откладываются значения квадратного корня из дисперсий (3), центральная линия определяется формулой (4), а положение контрольной границы (как правило, используется только верхняя граница) определяется как

$$UCL = B_4 \bar{s} \tag{6}$$

(B_4 , как и A_3 , – табличный коэффициент).

На рис. 1 соответствующие карты показаны для одного из показателей вибраций гидроагрегата, построенные по формулам (1)–(6) в системе Statistica. Карты свидетельствуют о стабильности процесса: ни на карте средних, ни на карте стандартных отклонений нет точек, выходящих за контрольные границы.

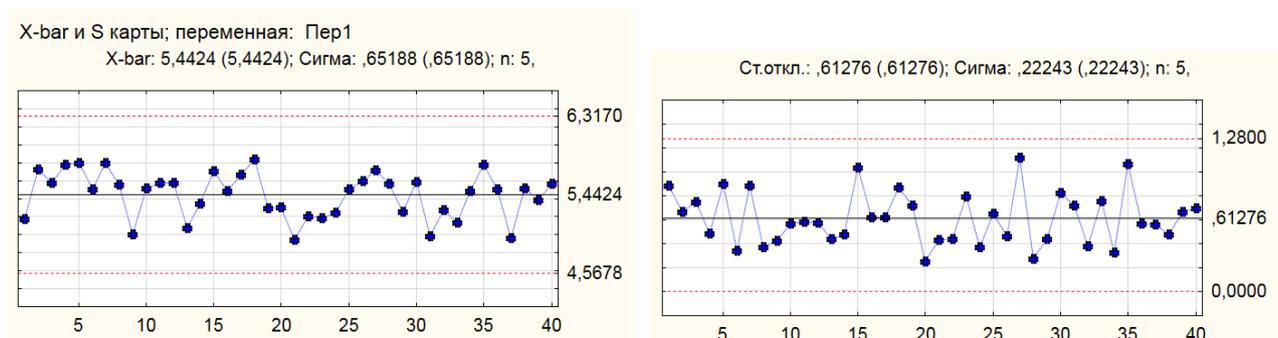


Рис. 1. Контрольные карты Шухарта для среднего уровня процесса и стандартного отклонения

Иногда проведение измерений связано с значительными техническими сложностями или большими затратами, в этом случае используются контрольные карты для индивидуальных значений: при этом объем мгновенной выборки $n = 1$. Такая ситуация имеет место, в частности, для си-

стемы водоочистки, где показатели качества питьевой воды контролируются один раз в сутки. Для характеристики рассеяния процесса в случае индивидуальных наблюдений строится карта скользящих размахов.

Оценка стабильности группы коррелированных показателей

При контроле p показателей, имеющих совместное нормальное распределение, для контроля среднего уровня многомерного процесса используется алгоритм Хотеллинга [3]: для каждой t -й мгновенной выборки ($t = 1, \dots, m$) вычисляется статистика

$$T_t^2 = n(\bar{x}_t - \mu_0)^T S^{-1}(\bar{x}_t - \mu_0), \quad (7)$$

где n – объем мгновенной выборки, \bar{x}_t – вектор средних в мгновенных выборках, μ_0 – вектор целевых средних.

Оценки компонент ковариационной матрицы S определяются по формуле

$$s_{jk} = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{t=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ijt} - \mu_j)(x_{ikt} - \mu_k), \quad j, k = 1, \dots, p. \quad (8)$$

Процесс считается стабильным при $T_t^2 < T_{кр}^2$, где

$$T_{кр}^2 = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{1-\alpha}(p, mn-m-p+1), \quad (9)$$

где $F_{1-\alpha}(k_1, k_2)$ – квантиль F -распределения Фишера с числами степеней свободы в числителе k_1 , в знаменателе – k_2 .

Построение многомерной карты Хотеллинга при проведении индивидуальных наблюдений предполагает расчет для каждого t -го наблюдения ($t = 1, \dots, m$) статистики

$$T_t^2 = (x_t - \bar{x})^T S^{-1}(x_t - \bar{x}). \quad (10)$$

При этом возникает проблема оценивания ковариационной матрицы S [13, 14]. При оценивании по всей выборке

$$S = \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m (x_t - \bar{x})(x_t - \bar{x})^T. \quad (11)$$

При этом критическое значение $T_{кр}^2$, определяющее положение границы карты Хотеллинга при контроле p показателей на уровне значимости α , основывается на бета-распределении

$$T_{кр}^2 = \frac{p(m+1)(m-1)}{m^2 - mp} \beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2}, \quad (12)$$

где $\beta_{\alpha, p/2, (m-p-1)/2}$ – квантиль бета-распределения порядка α с числами степеней свободы $p/2$ и $(m-p-1)/2$.

Другой вариант – оценивание ковариационной матрицы по размахам в выборках: скользящий размах определяется по формуле

$$v_t = x_{t+1} - x_t, \quad t = 1, \dots, m-1;$$

тогда вектор размахов

$$V^T = (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_{t-1});$$

а оценка ковариационной матрицы

$$S = \frac{1}{2(m-1)} V^T V. \quad (13)$$

В этом случае статистика Хотеллинга имеет распределение хи-квадрат с p степенями свободы. Для расчета положения контрольной границы используются квантили этого распределения:

$$T_{kp}^2 = \chi_{1-\alpha}^2(p). \tag{14}$$

Проведенные исследования показали [4], что расчет по формулам (11), (12) эффективнее проводить на этапе анализа процесса, а по формулам (13), (14) – на этапе мониторинга.

На рис. 2 в качестве примера показана карта Хотеллинга для двух коррелированных показателей качества питьевой воды: значения pH и окисляемости, построенная с использованием соотношений (10)–(12). Процесс стабилен: на карте нет точек, выходящих за контрольную границу.

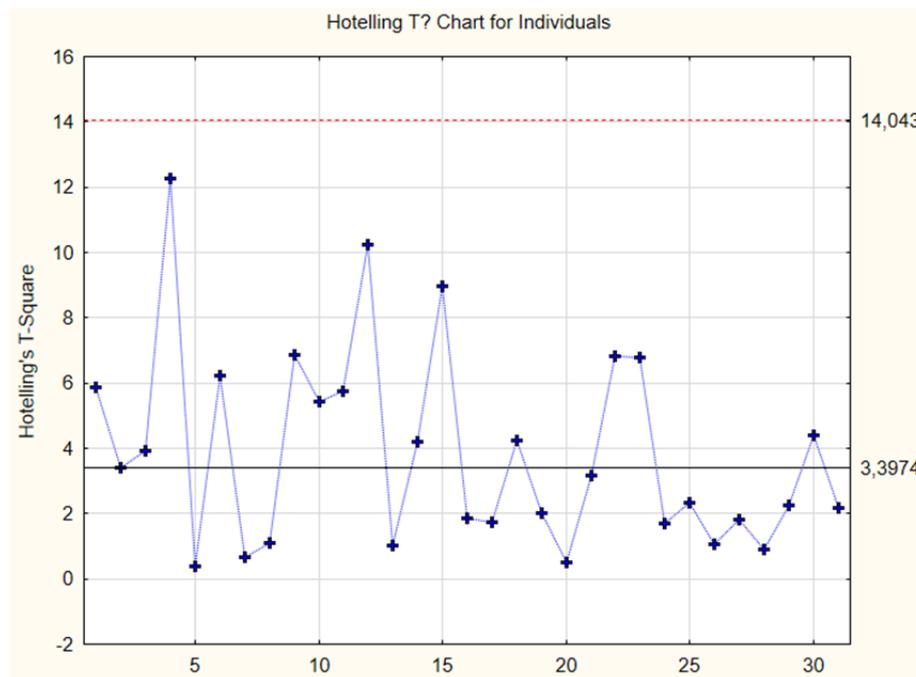


Рис. 2. Контрольная карта Хотеллинга

На практике при мониторинге процесса используют и другие критерии нестабильности процесса. Выход статистики Хотеллинга за контрольную границу – основной критерий нарушения стабильности процесса. Однако применение этого критерия далеко не всегда обеспечивает достаточно оперативное выявление значимых изменений процесса. Для повышения эффективности обнаружения изменений используется несколько подходов. Одним из них является выявление на карте структур специального вида, появление которых может свидетельствовать о нарушении процесса. Такими структурами могут быть тренд, приближение к оси абсцисс или к контрольной границе, резкие скачки значений статистики Хотеллинга, цикличность. Для выявления таких структур используется специальное программное обеспечение [15–17].

Основное назначение карты Хотеллинга – контроль среднего уровня многопараметрического процесса. Часто, как и для независимых показателей, необходим и контроль рассеяния процесса.

Контроль многомерного рассеяния сводится к проверке гипотезы о равенстве ковариационной матрицы процесса Σ заданной матрице Σ_0 . Используется обобщенная дисперсия [11, 12] – определитель ковариационной матрицы S_t , компоненты которой определяются по формулам (13), значение $|S_t|$ есть обобщенная дисперсия t -й мгновенной выборки. Вычисляются оценки средней ковариации по всей совокупности наблюдений

$$s_{jk} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m s_{jkt}, \tag{15}$$

которые образуют ковариационную матрицу S ; ее определитель $|S|$ используется в качестве оценки целевой обобщенной дисперсии $|\Sigma_0|$.

Контрольные границы (положение границ критической области) для обобщенной дисперсии определяются из соотношений [12]:

$$m_{|s|} \pm u_{1-\alpha/2} \sigma_{|s|}, \quad (16)$$

где $u_{1-\alpha/2}$ – квантиль нормального распределения порядка $1 - \alpha/2$, α – уровень значимости; если принять значение, соответствующее правилу «трех сигма»: $\alpha = 0,0027$, тогда $u_{1-\alpha/2} = 3$; математическое ожидание обобщенной дисперсии $m_{|s|} = b_1 |\Sigma_0|$; стандартное отклонение $\sigma_{|s|} = \sqrt{b_2} |\Sigma_0|$; коэффициенты

$$b_1 = \frac{1}{(n-1)^p} \prod_{j=1}^p (n-j); \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{1}{(n-1)^{2p}} \prod_{j=1}^p (n-j) \left[\prod_{k=1}^p (n-k+2) - \prod_{k=1}^p (n-k) \right], \quad (18)$$

тогда положение верхней UCL и нижней LCL границ обобщенной дисперсии определяется по формуле

$$\left. \begin{matrix} UCL \\ LCL \end{matrix} \right\} = |\Sigma_0| (b_1 \pm u_{1-\alpha/2} \sqrt{b_2}). \quad (19)$$

Из приведенных зависимостей следует, что построение карты обобщенной дисперсии по индивидуальным наблюдениям невозможно, необходимо иметь мгновенные выборки, объем которых хотя бы на единицу превышает количество контролируемых показателей.

На рис. 3 показана карта обобщенной дисперсии для трех коррелированных показателей температурного режима компьютера: *температуры графического процессора, видеокарты и центрального процессора, построенная по формулам (15)–(19) в среде электронных таблиц Excel*. Поскольку ведется контроль трех коррелированных показателей, использовано $n = 4$ (каждые четыре наблюдения рассматриваются как одна выборка).

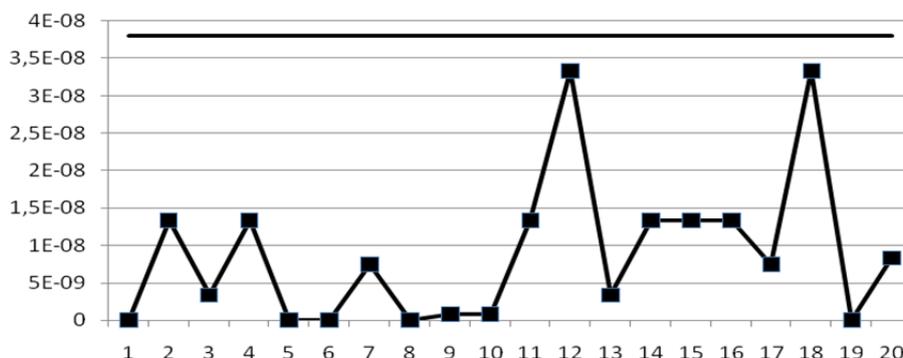


Рис. 3. Карта обобщенной дисперсии

Заключение

Проведенное исследование позволяет предложить следующую методику оценки стабильности функционирования технических систем:

- 1) изучаются условия работы аналогичных систем и выявляются возможные нарушения стабильности функционирования;
- 2) в условиях отлаженной (стабильной) работы системы снимают показания соответствующих датчиков и рассчитывают основные статистические характеристики: векторы средних значений и ковариационную матрицу;
- 3) выбирают набор возможных статистических инструментов для последующего контроля в зависимости от предполагаемых нарушений и уровня коррелированности параметров. Некоррелированные параметры контролируют инструментами на основе карты Шухарта, коррелированные – на основе статистики Хотеллинга и/или обобщенной дисперсии;
- 4) проводят постоянный мониторинг функционирования системы с целью диагностики нарушений стабильности.

Библиографический список

1. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 18–24.
2. Герасимов, О. Н. Методика текущего предупредительного статистического контроля / О. Н. Герасимов, А. Ю. Доросинский // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 30–32.
3. Клячкин, В. Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса / В. Н. Клячкин. – М. : Физматлит, 2011. – 196 с.
4. Клячкин, В. Н. Оценка стабильности показателей качества при очистке питьевой воды / В. Н. Клячкин, А. Д. Барт // Экологические системы и приборы. – 2017. – № 8. – С. 14–20.
5. Иванова, А. В. Статистическая обработка результатов вибромониторинга гидроагрегата / А. В. Иванова, И. Н. Карпунина, В. Н. Клячкин // Научный вестник УИГА. – 2017. – № 9. – С. 144–150.
6. Клячкин, В. Н. Оценка стабильности температурного режима компьютера / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина, М. К. Федорова // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 3 (45). – С. 58–64.
7. Клячкин, В. Н. Статистические методы анализа данных / В. Н. Клячкин, Ю. Е. Кувайскова, В. А. Алексеева. – М. : Финансы и статистика, 2016. – 240 с.
8. Клячкин, В. Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии / В. Н. Клячкин. – М. : Финансы и статистика, ИНФРА-М, 2009. – 304 с.
9. ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91). Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
10. Уиллер, Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Д. Уиллер, Д. Чамберс. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с.
11. Montgomery, D. C. Introduction to statistical quality control / D. C. Montgomery. – New York : John Wiley and Sons, 2009. – 754 p.
12. Святова, Т. И. Многомерный статистический контроль технологического рассеяния процесса / Т. И. Святова, В. Н. Клячкин // Радиотехника. – 2014. – № 11. – С. 123–126.
13. Sullivan, J. H. A Comparison of Multivariate Quality Control Charts for Individual Observations / J. H. Sullivan, W. H. Woodall // Journal of Quality Technology. – 1996. – Vol. 28. – P. 398–408.
14. Williams, J. D. Distribution of Hotelling's T2 Statistic Based on the Successive Difference Estimator / J. D. Williams, W. H. Woodall, J. H. Sullivan // Journal of Quality Technology. – 2006. – Vol. 38. – P. 217–229.
15. Клячкин, В. Н. Обнаружение нарушений при многомерном статистическом контроле технологического процесса / В. Н. Клячкин, Ю. А. Кравцов // Программные продукты и системы. – 2016. – № 3. – С. 192–197.
16. Горячев, Н. В. Структура автоматизированной лаборатории исследования теплопроводов / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 119–120.
17. Горячев, Н. В. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его тепловода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 242–243.

Клячкин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра прикладной математики и информатики,
Ульяновский государственный
технический университет
(432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
Email: v_kl@mail.ru

Klyachkin Vladimir Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of applied mathematics and informatics,
Ulyanovsk State Technical University
(432027, 32 Severny Venec street, Ulyanovsk, Russia)

Карпунина Ирина Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра общепрофессиональных дисциплин,
Ульяновский институт гражданской авиации
(432071, Россия, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8)
Email: karpunina53l@yandex.ru

Karpunina Irina Nikolaevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of general professional disciplines,
Ulyanovsk Institute of Civil Aviation
(432071, 8/8 Mozhaiskiy street, Ulyanovsk, Russia)

УДК 519.248: 681.518.5

Клячкин, В. Н.

Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 36–42. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-5.

Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов

ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ

R. O. Mishanov, M. N. Piganov, V. P. Perevertov

THE CHOICE OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF INTEGRATED CIRCUIT SPECIAL PURPOSE FOR THE INDIVIDUAL FORECASTING OF QUALITY AND RELIABILITY

Аннотация. *Актуальность и цели.* Определение электрических параметров интегральных микросхем, изготовленных по КМОП-технологии, для проведения индивидуального прогнозирования (ИП) показателей качества и надежности является важной составляющей процесса прогнозирования надежности, так как от их выбора значительно зависит как корректность прогнозов, так и их точность. При этом выбор параметров должен быть обоснован в соответствии с результатами физико-химических методов исследования отказов ИМС, изготовленных по конкретной технологии. Также немаловажным является учет статистических данных отказов КМОП ИМС. *Материалы и методы.* Систематизация информации по видам, признакам, причинам, механизмам отказов, а также возможным дефектам структуры ИМС в совокупности со статистическими данными по отказам позволяет выявить контролируемые параметры КМОП ИМС, несущие информацию о потенциальной надежности изделий. Определение электрических параметров КМОП ИМС, имеющих тенденцию к раннему выходу за установленные пределы и несущих информацию о наиболее вероятных отказах для данной технологии изготовления, позволяет получить необходимую точность прогнозов. *Результаты.* Приведенная в работе информация предназначена для определения набора электрических параметров КМОП ИМС для проведения ИП в зависимости от предполагаемых дефектов структуры и механизмов отказов, протекающих в структуре ИМС. Также в работе рассматривается влияние поражающих факторов космического пространства, что актуально для КМОП ИМС специального назначения. *Выводы.* Изменениям некоторых электрических параметров ИМС соответствует широкий набор возможных причин, механизмов отказов и дефектов. Такие параметры целесообразно использовать в качестве исходных данных для проведения ИП.

Abstract. *Background.* Determination of the electrical parameters of integrated microcircuits manufactured by CMOS technology for individual forecasting (PI) of quality and reliability indicators is an important component of the reliability prediction process. From their choice, both the correctness of the forecasts and their accuracy depends significantly. In this case, the choice of parameters should be justified in accordance with the results of physicochemical methods for investigating failures of IMS produced by a specific technology. It is also important to take into account the statistical data of CMOS IMS failures. *Materials and methods.* The systematization of information by types, attributes, causes, failure mechanisms, as well as possible defects in the IC structure, together with statistical data on failures, allows to identify the monitored parameters of CMOS ICs bearing information on the potential reliability of products. The determination of the electrical parameters of CMOS ICs, which tend to early exit beyond the established limits and carry information about the most probable failures for the given manufacturing technology, allows obtaining the necessary accuracy of forecasts. *Results.* The information given in this work is intended to determine the set of electrical parameters of the CMOS IC for carrying out the IP, depending on the expected structural defects and failure mechanisms occurring in the IC structure. Also, the work considers the impact of the damaging factors of outer space, which is relevant for CMOS special purpose IC. *Conclusions.* Changes in some electrical parameters of the IC correspond to a wide range of possible causes, failure mechanisms and defects. Such parameters should be used as the initial data for conducting IP. It is established that the set of electrical parameters can significantly change if there are suspicions of specific defects in the manufacture of IC.

Установлено, что набор электрических параметров может значительно изменяться при подозрениях на конкретные дефекты при изготовлении ИМС.

Ключевые слова: надежность, качество, безопасность, отказ, КМОП-микросхема, индивидуальное прогнозирование, электрические параметры, механизм отказов, виды отказов, причины отказов, дефект.

Key words: reliability, quality, safety, failure, CMOS chip, individual forecasting, electrical parameters, failure mechanism, failure mode, failure reasons, defect.

Введение

Организация и проведение мероприятий по повышению надежности технических устройств, устанавливаемых на борт космических аппаратов (КА), являются важнейшим аспектом в ракетно-космической отрасли [1, 2]. Стоит отметить, что заложение свойств надежности необходимо проводить на ранних этапах жизненного цикла изделия: при проектировании и конструировании, а обеспечивать – при изготовлении устройств. Широкое применение в бортовой аппаратуре получили интегральные микросхемы (ИМС), выполненные по КМОП-технологии и способные выполнять сложные функции по передаче, приему, преобразованию и хранению информации с необходимым быстродействием и энергопотреблением при сравнительно малом занимаемом пространстве. КМОП ИМС представляют собой совокупность проводников, сформированных с помощью фотолитографии в диэлектрической среде конечного объема [3]. Таким образом, к ИМС предъявляются достаточно жесткие требования по качеству и надежности, особенно при работе в условиях космического пространства (КП).

Кроме того, качество и надежность аппаратуры и применяемой в ней электронной компонентной базы (ЭКБ) в решающей степени зависит от правильной постановки, организации, методики и технологии контроля, измерений, испытаний и, в целом, от уровня метрологического обеспечения производства [4]. Немаловажным является проведение анализа статистики отказов аппаратуры и ее составных частей с выявлением наиболее критических элементов. В случае серийного производства изделий анализ отказов преимущественно опирается на анализ отказов ранее выпущенных таких же изделий. При освоении нового производства либо при единичном производстве, что имеет место в ракетно-космической отрасли, анализ отказов основывается на изделиях-аналогах, что несколько искажает необходимую информацию. Кроме того, согласно модели эволюции состояния электронных изделий [5] получение исчерпывающей информации о надежности изделий затруднено за счет накапливающихся структурных изменений, которые впоследствии могут привести к внезапному отказу. Таким образом, получение достоверной информации о надежности бортовых изделий является важнейшей составляющей при проектировании новой аппаратуры.

Отказу любого устройства предшествует аномальное поведение какого-либо параметра, характеризующего надежность данного изделия. Определение таких параметров, имеющих тенденцию к раннему выходу за установленные технической документацией (ТД) пределы, на ранних этапах жизненного цикла изделия является достаточно сложной задачей. Стоит отметить, что оптимальным подходом к проблеме надежности ИМС является совместное использование физического метода исследования отказов и статистического метода получения интенсивности отказов [6].

Индивидуальное прогнозирование показателей качества и надежности с применением математических моделей относится к способам обеспечения приемлемого уровня безопасности и надежности с минимальными затратами времени и ресурсов [7–11]. Важнейшей составляющей такого подхода является определение прогнозируемых параметров, т.е. параметров, несущих в себе информацию о надежности изделия. Для корректного определения таких параметров КМОП ИМС необходимо выявить взаимосвязи между видами отказов, их признаками, причинами; рассмотреть механизмы, вызывающие отказы; выявить электрические параметры, информирующие о возможном отказе.

Целью работы является определение электрических параметров КМОП ИМС для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности ИМС.

Исследование отказов ИМС

На рис. 1 представлена структурная схема исследования отказов ИМС, основанная на работе [6].

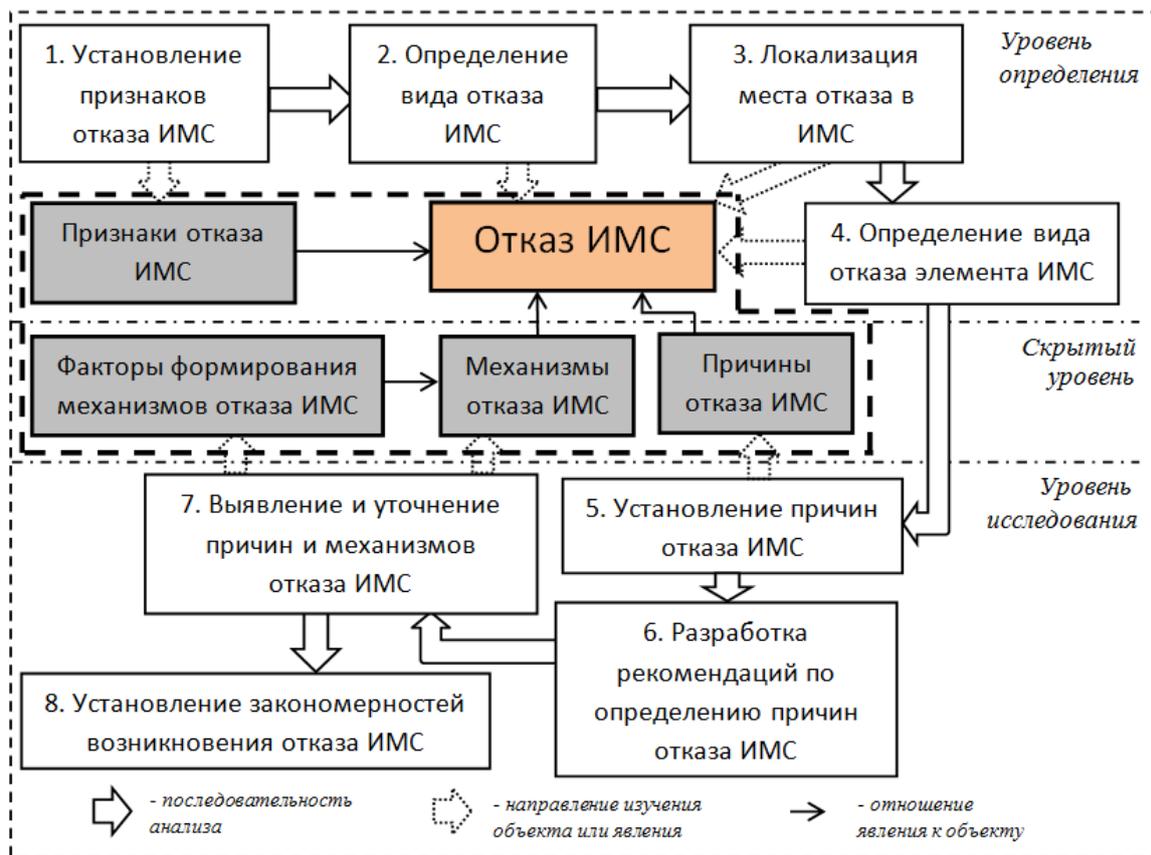


Рис. 1. Структурная схема исследования отказов ИМС

Согласно работе автора [6] исследование отказов проводится в два этапа: первичный и вторичный анализ отказов. В задачи первичного анализа входят:

- установление признаков отказа ИМС (установление различий параметров работоспособной и отказавшей ИМС);
- определение вида отказа ИМС;
- локализация места отказа;
- определение вида отказа элемента ИМС;
- установление причин отказа, т.е. событий, предшествовавших отказу;
- разработка рекомендаций по определению выявленных причин отказа.

Вторичный анализ отказов проявляется:

- в выявлении и уточнении причин и механизмов отказа ИМС;
- в установлении закономерностей их возникновения с помощью статистических, физических и физико-химических методов.

Виды отказов ИМС

В табл. 1 приведена классификация видов отказов ИМС, основанная на информации, приведенной в работах [12–14].

Таблица 1

Виды отказов КМОП ИМС

Признак деления	Вид отказа
1	2
Характер изменения параметра до момента возникновения отказа	Внезапный (катастрофический)
	Постепенный (деградационный)
Связь с другими отказами	Независимый
	Зависимый

Окончание табл. 1

1	2	
Возможность последующего использования изделия после возникновения отказа	Полный	
	Частичный	
Наличие внешних проявлений отказа	Очевидный (явный)	
	Скрытый (неявный)	
Характер устранения отказа	Устойчивый	
	Самоустраняющийся	Сбой
		Перебегающий
Причина возникновения отказа: при конструировании	Конструкционный (из-за нарушения норм конструирования)	
при изготовлении	Производственный (из-за нарушения норм технологического процесса изготовления)	
при эксплуатации	Эксплуатационный (из-за нарушения условий эксплуатации)	
Природа (происхождение) отказа	Естественный	
	Искусственный	
По механизму возникновения	Связанные с явлениями в объеме кристалла	
	Обусловленные явлениями на поверхности кристаллической структуры	
	Зависящие от состояния внутренних контактных соединений	
	Связанные с конструктивным оформлением	
	Связанные с внешними воздействиями	
По механизму процесса, вызывающего отказ (вид энергии, вызывающей отказ)	Вызванные диффузионными процессами (механическая энергия)	
	Вызванные дефектами и дислокациями (тепловая энергия)	
	Вызванные флуктуационными разрывами межатомных связей (электрическая энергия)	
	Вызванные разрывом химических связей (химическая)	
	Вызванные радиационными эффектами (электромагнитная)	

В работе [3] отмечается, что в общем случае в КМОП-элементах возможны две разновидности отказов в зависимости от структурного изменения: разрыв проводника, сформированного в малом объеме элемента; пробой диэлектрической пленки элемента.

Признаки отказов КМОП ИМС

Согласно структурной схеме исследования отказов ИМС (см. рис. 1) обнаружить отказ можно только по проявлению его признака. Для установления признаков отказа важным является сопутствующая изделию документация, в которой указаны режимы работы (испытаний) и условия, при которых произошел отказ, сведения о типе ИМС, номере партии, паспорте на ИМС и др.

Контроль КМОП ИМС сопровождается измерением статических и динамических электрических параметров [15]. В табл. 2 приведены наиболее часто измеряемые параметры ИМС [15–17].

Таблица 2

Измеряемые электрические параметры КМОП ИМС

Статические параметры	Динамические параметры
Ток потребления в статическом режиме	Время задержки включения и выключения
Ток потребления при высоком и низком уровне выходного напряжения	Время задержки распространения сигнала при включении и при выключении
Входной ток низкого и высокого уровня	Время перехода при включении и выключении
Напряжение блокировки	Максимальная тактовая частота
Выходное напряжение низкого и высокого уровня	Другие динамические параметры в зависимости от функционального назначения ИМС (время восстановления, время выборки адреса и др.)
Выходной ток низкого и высокого уровня	
Ток короткого замыкания	

Общие методы измерения и контроля электрических параметров цифровых ИМС регламентированы НТД [15–17].

Функционирование ИМС в условиях КП осложнено влиянием следующих факторов:

- естественные радиационные пояса Земли (ЕРПЗ);
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- галактические космические лучи (ГКЛ);
- отдельные и тяжелые заряженные частицы (ОЗЧ и ТЗЧ).

Под влиянием таких факторов возможно возникновение структурных изменений кристаллической решетки полупроводниковых материалов, а также ионизационных процессов в активных и пассивных областях слоев [18].

Следует упомянуть, что при воздействии мощного радиоизлучения у КМОП-микросхем наблюдаются обратимые и необратимые отказы, в отличие от ТТЛ ИМС, у которых наблюдаются только необратимые отказы [19].

В условиях КП вследствие возникновения ионизационных импульсных токов из-за ионизационных эффектов в структуре ИМС существует вероятность возникновения кратковременных изменений логического состояния ячеек памяти, триггеров и регистров. В худшем случае эти токи могут вызвать радиационное защелкивание (тиристорную защелку) в КМОП-структурах либо вторичный пробой диэлектриков.

Исследования отказов ИМС специального назначения (СН) на борту КА проводят при наземной отработке изделий путем имитирования условий КП, так как при эксплуатации КА исследование отказов ЭКБ затруднено из-за ряда причин. Формирование условий космической среды также является большой проблемой из-за необходимости использования дорогостоящего оборудования, невозможности имитации отдельных условий либо принципиальной невозможности формирования отдельных космических условий на Земле.

При проведении радиационных испытаний ряда ИМС СН автором [18] были выявлены признаки наступления отказов, характеризующиеся повышением или понижением:

- статического тока потребления;
- динамического тока потребления;
- уровней напряжения логических нуля и единицы.

В табл. 3 представлена информация по постепенным отказам, связанным с деградацией материалов, наличием или образованием дефектов и происходящими эффектами в ИМС вследствие влияния условий окружающей среды [6, 13, 14, 19, 20]. В табл. 4 приведены данные о взаимосвязи отказов, возможных причинах их возникновения и дефектах ИМС СН из-за влияния радиационных факторов КП [18].

Таблица 3

Взаимосвязь видов отказов, причин их возникновения и возможных дефектов в КМОП ИМС

Отказ (сбой)	Возможные причины	Дефект
1	2	3
Разрушение корпуса	– электрические перегрузки (повышенное напряжение, ток или мощность); – тепловые перегрузки; – механические напряжения корпуса; – негерметичность	Наличие дефектов в структуре корпуса
Отслоение кристалла	– тепловые перегрузки; – дефекты соединения кристалла с подложкой; – нарушения при технологической операции склеивания или пайки кристалла и корпуса	Неподходящий состав адгезива (преформы). Нарушение технологической операции монтажа
Повреждение оксидных слоев	– электростатический разряд; – наличие пор (тонких отверстий в оксидном слое); – влияние ионизирующего и радиационного излучения	Пустоты, микротрещины, поры в оксидном слое
Электрические разрушения	– электрическая перегрузка; – избыток влаги; – загрязнения	Наличие дефектов в структуре корпуса
	– наличие эффекта электромиграции в проводниках; – влияние высокой температуры	Наличие каналов протекания токов высокой плотности, пустот, холмиков. Дефекты на границах слоев

Продолжение табл. 3

1	2	3
Возрастание обратных токов <i>p-n</i> -переходов, дрейф коэффициента усиления в транзисторах	<ul style="list-style-type: none"> – диффузия примесей вдоль дефектов, влекущая появление тонких участков в базе; – дефекты кристаллической решетки вблизи сильно легированного <i>n</i>⁺ слоя и слоя базы; – концентрация токов вблизи дефектов; – локальные перегревы областей, в которых проходит обратный ток переходов 	Наличие дефектов вблизи протекания токов в слоях
Дрейф тока стока <i>I_c</i> и крутизны <i>S</i> в КМОП транзисторах	<ul style="list-style-type: none"> – некачественное защитное покрытие; – наличие остатков травителя, фоторезиста, растворов промывки, остаточных газов, влаги и др.; – разгерметизация ИМС; – рост ионного заряда в оксидном слое за счет загрязнений с поверхности слоя; – скопление положительного заряда на границе оксидного и полупроводникового слоя; – образование инверсных каналов в слоях; – уменьшение ширины <i>p-n</i>-перехода у поверхности структуры 	Наличие загрязнений в объеме оксидного слоя и ионов (Na ⁺ , K ⁺ , Li ⁺ , H ⁺ , O ⁻) на его поверхности
Рост токов утечки	<ul style="list-style-type: none"> – загрязнения поверхности полупроводника, оксидного слоя; – загрязнение поверхности оксидного слоя; – загрязнения и (или) повреждения фотошаблонов; – наличие в оксидном слое протравленных участков; – паразитная диффузия через поры в оксидном слое; – наличие влаги в подкорпусном пространстве 	Наличие загрязнений на поверхности
	<ul style="list-style-type: none"> – растрескивание оксидного слоя; – накопление заряда в пассивирующем оксидном слое, появление инверсного слоя 	Наличие микротрещин в оксидном слое
	<ul style="list-style-type: none"> – высокие погрешности фотолитографического процесса; – паразитные диффузии примесей через увеличенные окна в оксидном слое 	Увеличение размеров окон в оксидном слое
	<ul style="list-style-type: none"> – наличие трещин, отходящих от линий скрайбирования; – наличие трещин из-за разных коэффициентов термического расширения используемых материалов слоев; – воздействие механических напряжений 	Наличие трещин, проходящих через активную область структуры
Дрейф пробивного напряжения	<ul style="list-style-type: none"> – низкокачественный полупроводник; – появление эффекта лавинного пробоя из-за усиления электрического поля вблизи загрязнений; – проплавление металлизации через слои диффузии 	Наличие загрязнений в структуре полупроводника
Снижение пробивного напряжения	<ul style="list-style-type: none"> – загрязнения поверхности полупроводника, оксидного слоя, фоторезиста; – недостаточная адгезия фоторезиста; – загрязнение поверхности оксидного слоя или фоторезиста; – загрязнения и (или) повреждения фотошаблонов; – наличие в оксидном слое протравленных участков; – паразитная диффузия через поры в оксидном слое 	Наличие пор в оксидном слое

1	2	3
Короткое замыкание	– низкокачественный полупроводник; – появление эффекта лавинного пробоя из-за усиления электрического поля вблизи загрязнений; – проплавление металлизации через слои диффузии	Наличие загрязнений в структуре полупроводника
	– электродиффузия кремния в алюминий в области положительного контакта; – замыкание <i>p-n</i> -перехода при длительном прохождении тока большой плотности тока ($i \approx 10^{10}$ А/м ²) при высокой температуре (около 200 °С)	Наличие ямок травления на границе слоя металла и полупроводника
	– растрескивание оксидного слоя	Наличие микротрещин в оксидном слое
	– высокие погрешности фотолитографического процесса; – паразитные диффузии примесей через увеличенные окна в оксидном слое	Увеличение размеров окон в оксидном слое
	– воздействие механических напряжений; – плохая адгезия металла к оксидному слою; – продольная миграция металла под оксидным слоем или защитным стеклом; – образование металлических закороток	Наличие металла или защитного стекла под оксидным слоем
	– отслаивание металлизации; – оседание частиц металла на поверхности кристалла	Наличие посторонних металлических частиц внутри корпуса ИМС.
Разрушение слоев металлизации, обугливание	– электростатические разряды; – коррозия; – электрические перегрузки; – тепловые перегрузки; – «усь» на металлизации; – проникновение влаги	Наличие пустот и пор в слое металлизации
Обрывы металлизации	– электродиффузия металла под действием большой плотности тока ($i \approx 10^{10}$ А/м ²) при высокой температуре (около 200 °С)	Наличие пустот у контактной площадки стоковой области
	– взаимодиффузия металлов при термокомпрессии, например Al-Au, Mo-Au, Ti-Au; – образование интерметаллических соединений; – снижение механической прочности контактов; – перегрев и оплавление перемычек между пустотами в местах контакта	Наличие пустот в термокомпрессионных контактах
	– электродиффузия металла в местах прохождения повышенных токов	Наличие пустот в металлизации
	– неравномерность металлизации; – разрывы на ступеньках оксидного слоя; – повышенная электродиффузия металла с локальным выгоранием слоя	Утончение металлизации
	– низкая адгезия металла выводов к контактным площадкам; – нарушение режима «вжигания» металла в полупроводниковый слой; – механические напряжения	Наличие отслаивания, раковин, царапин металлизации
	– сдвиговые воздействия на места контактов; – технологические дефекты в контактах	Разрыв или отслаивание вывода от контактной площадки
	– пережим вывода около места контакта; – перегрев места сужения при большом токе	Сужение вывода около места термокомпрессионного контакта

Таблица 4

Взаимосвязь видов отказов, причин их возникновения и возможных дефектов в КМОП ИМС из-за влияния радиационных факторов КП

Отказ (сбой)	Возможные причины	Дефект
Необратимые отказы из-за радиационных факторов		
SEL (Single Event Latchup) Радиационное защелкивание (включение паразитных тиристорных четырехслойных структур)	Усиление ионизационных токов паразитными биполярными транзисторами, влияние ОЗЧ и ТЗЧ	Наличие макродефектов в диэлектрической пленке
SEHE (Single Event Hard Error) Одиночный микродозовый отказ	Локальное выделение энергии в чувствительном объеме активного элемента ИМС из-за попадания ОЗЧ	
SEB (Single Event Burnout) Одиночный эффект выгорания транзисторной структуры	Открытие паразитного биполярного транзистора при попадании ОЗЧ	Наличие макродефектов в диэлектрической пленке
SEGR (Single Event Gate Rupture) Одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика	Накопление заряда в макродефектах	
SES (Single Event Snapback) Одиночный эффект вторичного пробоя транзисторной структуры	Усиление ионизационных токов паразитными биполярными транзисторами, влияние ОЗЧ и ТЗЧ	
Короткое замыкание, снижение пробивного напряжения	«Пострадиационный эффект»: – захват носителей заряда макродефектами, соизмеримыми с толщиной оксидного слоя, вследствие ионизации диэлектрика; – термический выброс носителей заряда с макродефектов	
Обратимые отказы из-за радиационных эффектов		
SEU (Single Event Upset) Обратимый одиночный сбой (кратковременные изменения логического состояния ячеек памяти, кратковременная потеря информации)	Появление ионизационных импульсных токов из-за ионизационного излучения	Наличие макродефектов в диэлектрической пленке
SEFI (Single Event Functional Interrupt). Одиночный сбой прерывания функционирования (кратковременная потеря работоспособности)	Попадание ОЗЧ в чувствительную область ИМС	
SET (Single Event Transient) Переходная ионизационная реакция	Попадание ОЗЧ в чувствительную область ИМС	

Установлено, что в КМОП ИМС преобладающими дефектами являются дефекты оксидной пленки (более 60 % отказов) [14]. Был определен механизм деградации пленки, заключающийся в наличии макродефектов, которые в процессе функционирования ИМС накапливают заряд, причем более активно при воздействии ионизирующего излучения. Обнаружение таких макродефектов с помощью электрических методов затруднено, так как макродефекты электрически нейтральны. Поэтому применяют способы локализации макродефектов под влиянием климатических воздействий, например, способ контроля наличия макродефектов, заключающийся в последовательном применении облучения и термообработки [14, 20, 21]. При отсутствии макродефектов в оксидной пленке ИМС восстанавливает свои параметры после облучения и термообработки, иначе параметры не восстанавливаются [14].

Установлено, что КМОП ИМС космического назначения подвержены радиационным эффектам в активных элементах, при этом транзисторные структуры наиболее чувствительны к ним.

Основным признаком отказа КМОП ИМС СН при воздействии условий КП является выход значения тока потребления ИМС за установленные пределы, указанные в технической документации. Например, для КМОП БИС, имеющей структуру базового матричного кристалла (БМК), в ста-

тическом режиме работы ток потребления возрастает, в динамическом режиме – уменьшается. Для микросхем динамической памяти при наблюдении эффекта тиристорного защелкивания ток потребления ИМС также выходит за установленные пределы. Для микропроцессорных СБИС установлено, что отказ, как правило, определяется по повышенному значению статического тока потребления. Для ИМС энергонезависимой памяти при воздействии радиационных поражающих факторов отмечены массовые сбои в ячейках памяти. При отключении и последующем включении ИМС информация в ячейках не восстанавливалась, но в последующем ИМС оказывалась работоспособной [18].

Так как КМОП ИМС являются полупроводниковыми приборами, то они подвержены пострадиационному эффекту. В таком случае из-за наличия макродефектов в диэлектрических структурах ИМС через некоторое время возникают отказы при воздействии повышенной температуры после влияния низкоинтенсивного ионизирующего излучения (ИИ). «Дырки» накапливаются в макродефектах диэлектрика и на поверхности раздела слоев полупроводника и диэлектрика во время влияния ИИ и последующем освобождении положительного заряда с этих уровней, которое ускоренно протекает при повышенных температурах [20]. В таком случае величина пробивного напряжения снижается из-за наличия свободных «дырок», что может вызвать пробой диэлектрика.

Механизмы отказов КМОП ИМС

Исследование механизмов отказов ИМС позволяет заложить такие проектные и технологические нормы на этапе проектирования, конструирования и производства ИМС, которые позволяют значительно увеличить срок службы микросхем. В общем случае механизмы отказов формируются тремя факторами: конструкцией, технологией изготовления, режимом и условиями эксплуатации.

В качестве конструкционного отказа можно рассмотреть случай образования интерметаллического соединения $AuAl_2$ («пурпурной чумы») в месте контакта золотого проволочного вывода и алюминиевой металлизации. Такое соединение обладает низкой механической прочностью, что может вызвать обрыв проволоки. Такой отказ наиболее вероятен для ИМС, работающей в импульсном режиме.

Отказы ИМС, связанные с несовершенством технологии изготовления, происходят вследствие:

- дефектов полупроводниковой пластины («ростовые», т.е. возникающие при выращивании пластины и вносимые технологией изготовления);
- механических повреждений (сколы, трещины, царапины, микротрещины слоев);
- несовершенства контактов и монтажа (разбрызгивание металла по поверхности кристалла, низкое качество соединений проводов, слабый контакт токопроводящих элементов, образование коррозии);
- низкое качество герметизации (появление посторонних частиц, влаги);
- неточности фотолитографии (смещение слоев, наличие остатков частиц травителя, непротравы, плохая промывка);
- диффузии (недостаток или избыток диффузионного материала, искажение удельного сопротивления);
- дефектов металлизации (низкое качество омических контактов, впадения в кристалл, поры, царапины, изломы металлизации) [6, 13].

Наиболее часто эксплуатационные отказы связаны с использованием ИМС при повышенных температурах. В таком случае в некоторых местах структуры ИМС рассеиваемая мощность может оказаться выше допустимой, что может вызвать проплавление металлизации через диффузионные слои полупроводника либо электродиффузию атомов кремния в алюминий из-за высокой плотности токов [6].

Статистически основными причинами отказов ИМС являются дефекты, вносимые в процессе производства (около 90 %) и в результате нарушений правил эксплуатации (около 10 %) [22]. Половина отказов из-за несовершенства технологии изготовления ИМС связана с некачественными соединениями (пленочными, контактными на границе слоев, проволочными).

Отказы, вызванные деградацией материалов, обусловлены длительными процессами старения, изнашивания, коррозии, усталости при условии соблюдения всех норм проектирования, изготовления и эксплуатации. Стоит отметить, что протекание явлений деградации существенно ускоряется при наличии примесей и нестабильных дефектов полупроводника.

Во многих случаях деградиционные процессы в ИМС связаны со следующими явлениями:

- диффузией, т.е. процессом массопереноса внутри слоя, между слоями, на поверхности, в металлизации и т.д.;
- электромиграцией, т.е. процесса массопереноса внутри проводников под воздействием электрического тока;
- релаксацией внутренних механических напряжений;
- явлениями дефектообразования [13].

Дрейф пробивного напряжения и короткое замыкание внутри ИМС свидетельствуют об отказе вследствие различных причин и механизмов. Особого внимания заслуживает эффект электромиграции в металлизации, что наиболее вероятно в связи с тенденцией уменьшения размеров транзисторных структур ИМС и увеличением рабочих частот. Механизм заключается в столкновении токов высокой плотности с атомами кристаллической решетки. В некоторых случаях поток электронов выталкивает атом из решетки в сторону положительно заряженного электрода, что вызывает образование пустот. В этом месте электрическое сопротивление возрастает, что ведет к нагреву области. Многократно повторяющийся эффект ведет к разрушению проводника в одних зонах, образуя пустоты и лакуны (в англоязычной литературе – *void*), и к скоплению материала по пути протекания тока к положительному электроду, образуя холмики (бугорки, в англоязычной литературе – *hillock*). Разрушение проводника приводит к образованию узких каналов металлизации либо к обрыву контакта. Образование холмиков может привести к электрическому пробое слоёв диэлектриков, находящихся рядом с бугорками. В работах [23–25] эффект электромиграции описывается наиболее подробно с приведением математических моделей эффекта. Как правило, основной способ борьбы с электромиграцией заключается в изменении топологии ИМС после моделирования работы схемы [26].

Механические напряжения, возникающие в кристалле ИМС, по видам оказываемого воздействия на кристалл подразделяют на следующие виды:

- термические;
- концентрационные;
- структурные и межфазные [27].

Результатом влияния механических напряжений является увеличение концентрации и подвижности точечных дефектов и образование макроскопических дефектов, влияющих на параметры ИМС [28]. Установлено, что образование механических напряжений вблизи транзисторных структур приводит к усилению зависимости величины обратного тока от напряженности электрического поля [29].

Стоит упомянуть, что полупроводниковые пластины, являющиеся конструктивной основой ИМС, изначально в своем объеме имеют дефекты кристаллической решетки и вкрапления примесных атомов. Например, в кремниевых пластинах основными примесями, значительно влияющими на электрофизические характеристики ИМС, являются атомы кислорода и углерода. Как правило, концентрация атомов кислорода в кремниевых пластинах, изготовленных эпитаксиальным наращиванием по методу Чохральского, составляет $2 \cdot 10^{18} - 10^{17}$ атом/см³, методом зонной плавки – 10^{16} атом/см³. Концентрация атомов углерода в кремнии составляет $10^{16} - 10^{17}$ атом/см³, причем их концентрация неравномерна из-за малого коэффициента сегрегации [13]. Атомы кислорода влияют на возникновение, движение и размножение дислокаций. Кроме этого, технологический процесс изготовления полупроводниковых ИМС включает в себя операции диффузии донорных и акцепторных примесей. Таким образом, распределение примесных атомов в объеме полупроводника неоднородно, что влияет на процент выхода годных ИМС и определяет основные характеристики схемы и уровни шума [30–33].

Заключение

В работе представлена информация по отказам КМОП-микросхем, учитывающая общие закономерности для данной технологии. Информация предназначена для разработки и совершенствования способов повышения надежности микросхем.

Для процедуры индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности КМОП ИМС приведенные в работе сведения о признаках отказов показывают, что в большинстве случаев в качестве прогнозируемого параметра следует выбирать ток утечки, так как он свидетельствует о широком спектре возможных причин отказов и возможных дефектах структуры. Изменение величин

ны пробивного напряжения также может быть вызвано достаточно широким набором возможных причин и дефектов. Выбор других параметров в качестве прогнозируемых может быть обоснован при подозрениях о наличии определенных дефектов в структуре ИМС, вносимых технологическим процессом производства, либо низким качеством комплектующих.

Библиографический список

1. *Абрамов, О. В.* Актуальность проблемы обеспечения надежности / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 3–7.
2. *Абрамов, О. В.* Существует ли в нашей стране проблема надежности? / О. В. Абрамов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 5–6.
3. *Авакян, А. А.* Закон распределения отказов элементов и систем электроники / А. А. Авакян, А. Г. Дмитриенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 47–53.
4. *Tyulevin, S. V.* Methods of bipolar microcircuits learning experiment / S. V. Tyulevin, M. N. Piganov, E. S. Erantseva // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1904. – P. 209–213.
5. *Саушев, А. В.* Структура процесса управления состоянием сложных электротехнических систем / А. В. Саушев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 23–30.
6. *Готра, З. Ю.* Контроль качества и надежность микросхем : учебник для техникумов / З. Ю. Готра, И. М. Николаев. – М. : Радио и связь, 1989. – 168 с.
7. *Пиганов, М. Н.* Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок / М. Н. Пиганов. – М. : Новые технологии, 2002. – 267 с.
8. *Пиганов, М. Н.* Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Вып. 1. – С. 175–182.
9. *Тюлевин, С. В.* Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – Вып. 1. – С. 92–96.
10. *Piganov, M.* Individual prognosis of quality indicators of space equipment elements / M. Piganov, S. Tyulevin, E. Erantseva // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM 2015) : Proceeding XIII international conference. – Ukraine, Lviv, 2015. – P. 367–371.
11. *Mishanov, R.* Individual forecasting of quality characteristics by an extrapolation method for the stabilitrons and the integrated circuits / R. Mishanov, M. Piganov // The experience of designing and application of CAD systems in Microelectronics (CADSM 2015) : Proceeding XIII international conference. – Ukraine, Lviv, 2015. – P. 242–244.
12. *Федоров, В. К.* Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. К. Федоров, Н. П. Сергеев, А. А. Кондрашин ; под ред. В. К. Федорова. – М. : Техносфера, 2005. – 205 с.
13. *Горлов, М. И.* Геронтология кремниевых интегральных схем / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, А. В. Строгонов ; отв. ред. Б. И. Казуров. – М. : Наука, 2004. – 240 с.
14. *Харченко, В. А.* Проблемы надежности электронных компонентов / В. А. Харченко // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 1 (69). – С. 52–57.
15. ГОСТ 18683.0-83. Микросхемы интегральные цифровые. Общие требования при измерении электрических параметров.
16. ГОСТ 18683.1-83. Микросхемы интегральные цифровые. Методы измерения статических электрических параметров.
17. ГОСТ 18683.2-83. Микросхемы интегральные цифровые. Методы измерения динамических электрических параметров.
18. *Иванов, А. О.* Экспериментальные исследования радиационной стойкости элементной базы бортовой аппаратуры космических аппаратов / А. О. Иванов, А. Г. Кохановский, Г. В. Кремез, В. П. Лачугин // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. – 2013. – № 641. – С. 12–18.
19. *Пирогов, Ю. А.* Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю. А. Пирогов, А. В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–38.
20. *Попов, В. Д.* Пострадиационный эффект в ИС. Неразрушающий контроль качества ИС / В. Д. Попов // Электроника : Наука, Технология, Бизнес. – 2002. – № 4. – С. 36–41.
21. MIL-STD-883E. Method 1019.5. Ionizing radiation (total dose) test procedure.
22. *Романова, М. П.* Сборка и монтаж интегральных микросхем : учеб. пособие / М. П. Романова. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 95 с.
23. *Blech, I. A.* Electromigration in Thin Aluminum Films on Titanium Nitride / I. A. Blech // Journal of Applied Physics. – 1976. – Vol. 47. – P. 1203–1208.
24. *Black, J. R.* Mass transport of aluminum by momentum exchange with conduction electrons / J. R. Black // Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium. – 1967. – P. 148–159.
25. *Averbuch, A.* Computation for electromigration in interconnects of microelectronics devices / A. Averbuch, M. Israeli, I. Ravve, I. Yavneh // Journal of Computational Physics. – 2001. – Vol. 167. – P. 316–371.

26. Синтез топологии стандартных КМОП ячеек с учетом эффекта электромиграции / В. П. Розенфельд, Л. А. Зинченко, Р. Л. Мазияс, Ю. Г. Смирнов, С. В. Сомов, И. Г. Топузов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2008 : сб. науч. тр. / под общ. ред. А. Л. Стемпковского. – М. : ИППМ РАН, 2008. – С. 120–125.
27. Соколов, В. И. Физические аспекты надежности интегральных схем / В. И. Соколов, С. Н. Лавренко // Физические аспекты надежности интегральных схем : сб. тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 1993. – С. 42–44.
28. Беренштейн, Г. В. Прогнозирование качества ИС на основе анализа внутренних напряжений / Г. В. Беренштейн, А. М. Дьяченко // Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов : сб. тез. докл. 3-й всес. конф. – Кишинев, 1991. – Ч. II. – С. 136.
29. Грушко, Н. С. Диагностика надежности кремниевых фотоприемников с p-n переходом / Н. С. Грушко, С. В. Бунярский // Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов : сб. тез. докл. 3-й всес. конф. – Кишинев, 1991. – Ч. II. – С. 127.
30. Малинин, А. Ю. Анализ требований к полупроводниковым приборам / А. Ю. Малинин, Ю. Н. Кузнецов, Л. А. Иванютин, Б. В. Кутубидзе // Электронная техника. Сер.: Материалы. – 1978. – Вып. 3. – С. 34–39.
31. Горячев, Н. В. Структура автоматизированной лаборатории исследования теплоотводов / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 119–120.
32. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб., 2014. – 480 с.
33. Юрков, Н. К. Алгоритм моделирования процессов развития латентных технологических дефектов печатных плат / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Е. А. Данилова // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 : сб. тр. – М. : Изд-во ИПУ РАН, 2014. – С. 7092–7097.

Мишанов Роман Олегович

аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: mishanov91@bk.ru

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Перевертов Валерий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра наземных транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет путей сообщения
(443066, Россия, г. Самара, Первый безымянный пер., 18)
E-mail: vperevertov@yandex.ru

Mishanov Roman Olegovich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of construction and technology of electronic systems and devices department,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Perevertov Valeriy Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of land transport and technological means,
Samara State University
of Way of Communication
(443066, 18 The first nameless lane, Samara, Russia)

УДК 621.382

Мишанов, Р. О.

Выбор электрических параметров КМОП ИМС специального назначения для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 43–54. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-6.

Д. В. Дерябин, Е. А. Алимova, Г. А. Смирнов, А. В. Шульгин, А. А. Ольховой

КАЧЕСТВО СЛОЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИКИ МАРОК ВК94, ВК95

D. V. Deryabin, E. A. Alimova, G. A. Smirnov, A. V. Shul'gin, A. A. Ol'khovoy

CONTROL OF METALIZATION OF CORUNDUM CERAMICS

Аннотация. При производстве вакуумных электронных компонентов широкое применение нашли изделия из корундовой керамики с металлизированными поверхностями в качестве основного элемента вакуумного блока и (или) изолятора, спаянными с металлической арматурой. К спаям керамических изделий и металлической арматуры предъявляются повышенные требования по прочности и герметичности. Качество паяного шва керамического изделия с металлической арматурой зависит от многих факторов – это конструкция шва, качество металлической арматуры, качество металлизации керамических изделий и качество самой корундовой керамики. В данной статье рассматриваются причины низкой прочности и нарушения герметичности паяных швов корундовой керамики с металлической арматурой, вызванной некачественным слоем металлизации на поверхности керамики. Проведены исследования по влиянию процентного содержания кислорода в слое металлизации на усилие отрыва и вакуумную плотность после пайки. Определен химический состав поверхности слоя никеля, нанесенного на поверхность металлизации, в зависимости от его толщины и влияния толщины никелевого покрытия на качество паяных швов. Выявлены причины неудовлетворительного нанесения гальванического никеля.

Ключевые слова: керамика, вакуумная плотность, металлизация, электронная растровая микроскопия, химический анализ, фрактографический анализ.

Abstract. In the manufacture of vacuum electronic components, the products from corundum ceramics with metallized surfaces have been widely used as the main element of the vacuum block and / or insulator, welded to metal fittings. The seals of ceramic products and metal fittings are subject to strict standards for strength and vacuum tightness. The quality of the soldered seam of a ceramic product with metal fittings depends on many factors: the design of the seam, the quality of the metal fittings, the quality of the metallization of the ceramic products, and the quality of the corundum ceramics itself. This article examines the reasons for the low strength and the loss of tightness of the soldered seams of corundum ceramics with metal fittings caused by a poor-quality layer of metallization on the surface of the ceramic. Studies have been carried out on the effect of the oxygen concentration in the metallization layer on the tearing force and the vacuum tightness after soldering. The chemical composition of the nickel layer surface, applied on the metallization surface, is defined, depending on its thickness and the influence of the thickness of the nickel coating on the quality of the soldered seams. The reasons for the unsatisfactory application of galvanic nickel are found out.

Key words: ceramics, vacuum density, metallization, electron scanning micro-scope, chemical analysis, fractographic analysis.

Введение

Вакуумные коммутирующие устройства (ВКУ) широко используются в радиотехнической аппаратуре для коммутации высоких напряжений и больших токов в наносекундном диапазоне. Областью применения ВКУ являются стационарная и бортовая аппаратура связи, комплексы радиоэлектронного противодействия, антенно-фидерные устройства и т.д. ВКУ состоит из двух основных узлов: вакуумного блока с рабочими контактами и электромагнитного привода. Вакуумный блок представляет собой металлокерамическую вакуумноплотную камеру из последовательно спаянных керамических деталей и соединительной арматуры.

Жесткие условия эксплуатации и повышенные требования к надежности требуют применения особых методов пайки соединений металлической арматуры ВКУ с керамическим корпусом вакуумной камеры. Несмотря на достаточное освещение в технической литературе технологии пайки керамики с металлом [1], вопросы получения прочных и герметичных швов не теряют своей актуальности. Цель предлагаемой статьи – исследование слоя металлизации изделий из керамики ВК94, ВК95 и выяснение причин брака по натеканию после пайки припоем ПСр72 в среде водорода.

Так как корпус камеры ВКУ является готовым (покупным) изделием, то входной контроль сводится, как правило, к пайке минимум двух деталей от партии с последующей проверкой на герметичность и определением усилия отрыва с визуальным осмотром места разрушения паяного соединения. Отрыв, как правило, проводят с применением подручных средств и с чисто субъективной оценкой усилия. Периодически проверяется вакуумная плотность и после многократного термоциклирования при 600°C в окислительной атмосфере [2].

Влияние химического состава и параметров металлизации на качество паяных швов

В работе были проведены исследования металлизированной керамики типа ВК94 и ВК95, полученной от разных производителей. Слои металлизации керамики исследовали с применением электронного растрового микроскопа «Vega 3 SBH» фирмы «Tescan», оснащенного системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа с беззотным детектором X-max 20 Standard. Измеряли толщину слоев металлизации никеля, а также проводили рентгеноспектральный микроанализ на фрактограммах [3].

Контрольный отрыв керамики после пайки приводил к одному из трех видов разрушения:

- отслоение по слою металлизации с полученной гладкой поверхностью места разрушения,
- ребристое состояние поверхности разрушенного слоя,
- ребристая поверхность с местными сколами керамики.

В первом случае отрыв медных заглушек происходит без видимых усилий. Слой металлизации равномерно распределен как по поверхности керамики, так и на ответной медной поверхности. В двух других случаях усилие отрыва значительно выше. Разрушение происходит по толщине слоя металлизации с ощутимым потрескиванием (хрупкое разрушение) и неравномерным его распределением по обеим паяным поверхностям. Как показал химический анализ, содержание кислорода в слое металлизации в первом случае составляет от 35 до 48 %, что объясняет низкую прочность и отсутствие вакуумной плотности после пайки. В двух других случаях содержание кислорода – от 15 до 30 %. На содержание кислорода в слое металлизации влияет точка росы водорода при вжигании металлизационной пасты. Обычно точка росы водорода на первом высокотемпературном этапе составляет 30 °С, а затем для восстановления молибдена подается сухой водород (–40 °С) [4, 5].

На рис. 1 представлена фрактограмма качественного слоя металлизации, который обеспечивает положительные результаты по вакуумной плотности на всех этапах технологического цикла изготовления изделий.

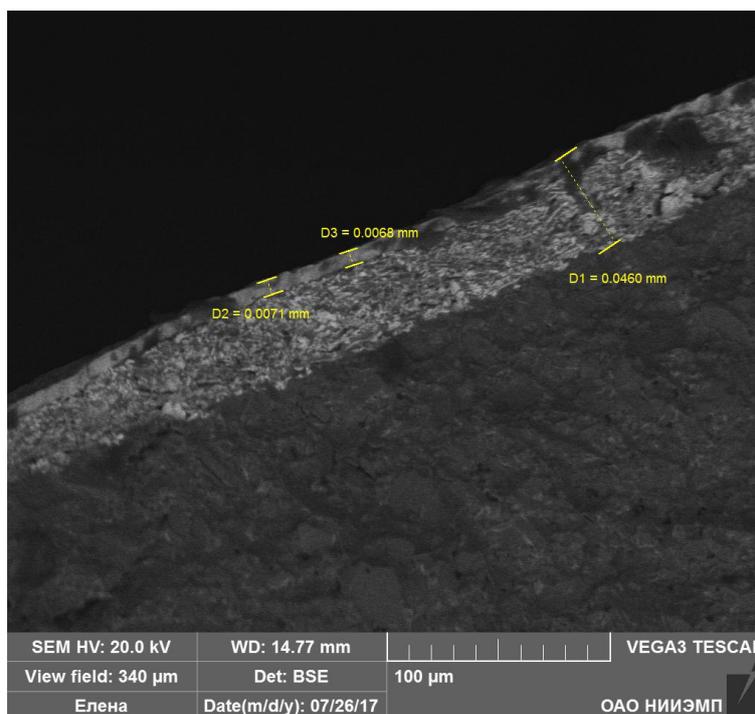


Рис. 1. Фрактограмма качественного слоя металлизации

Слой металлизации с равномерно распределенными частицами молибдена и содержанием кислорода в пределах 27–32 %. Толщина слоя никеля и слоя металлизации оптимальны. Количественный химический состав слоя металлизации не приводится в коммерческих соображениях, так как у разных производителей керамики свои оберегаемые технологические нюансы.

На рис. 2 приведена фрактограмма слоя металлизации серийно поставляемых изделий. Введенный контроль качества слоя металлизации по фрактограммам показал, что толщина слоя металлизации – от 9 до 70 мкм. При незначительных толщинах слоя металлизации усилие отрыва, как правило, можно отнести к первому виду разрушения.

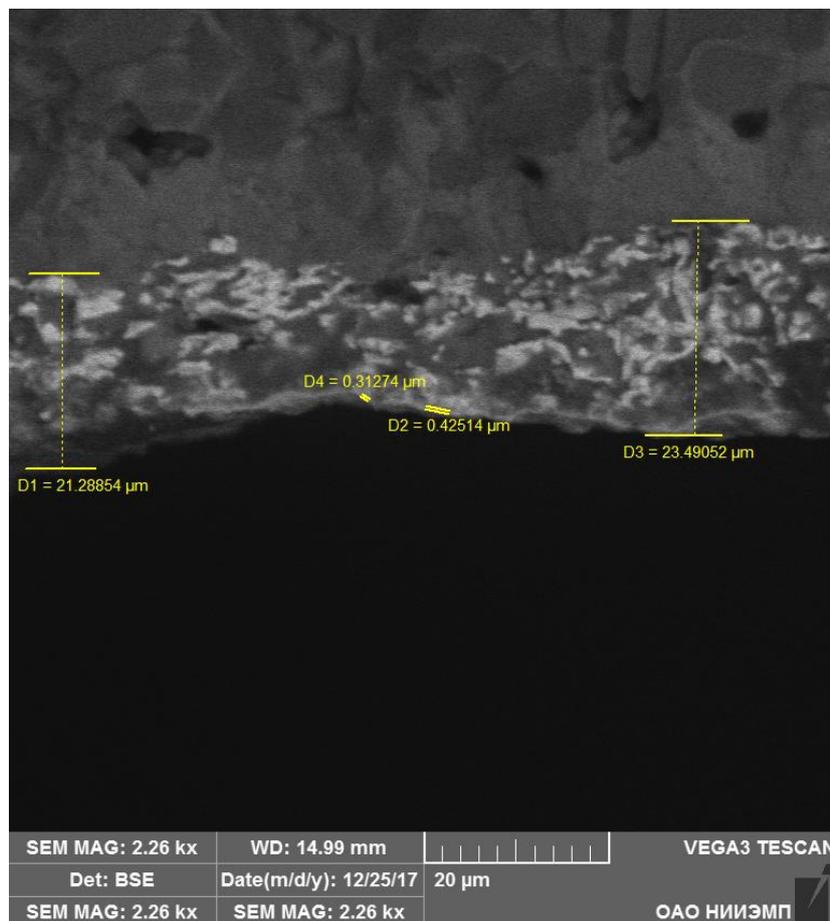
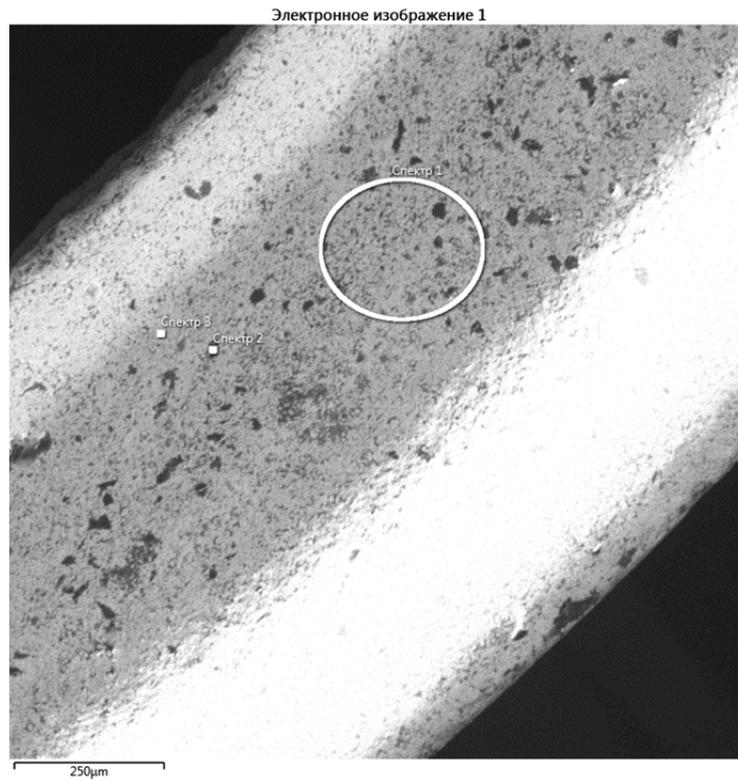


Рис. 2. Фрактограмма слоя металлизации серийно поставляемых изделий

Распределение молибденового порошка зачастую крайне неудовлетворительно. Видны большие включения стеклофазы (участки серого цвета), что подтверждено количественным химическим анализом. Слой никеля – менее 0,5 мкм.

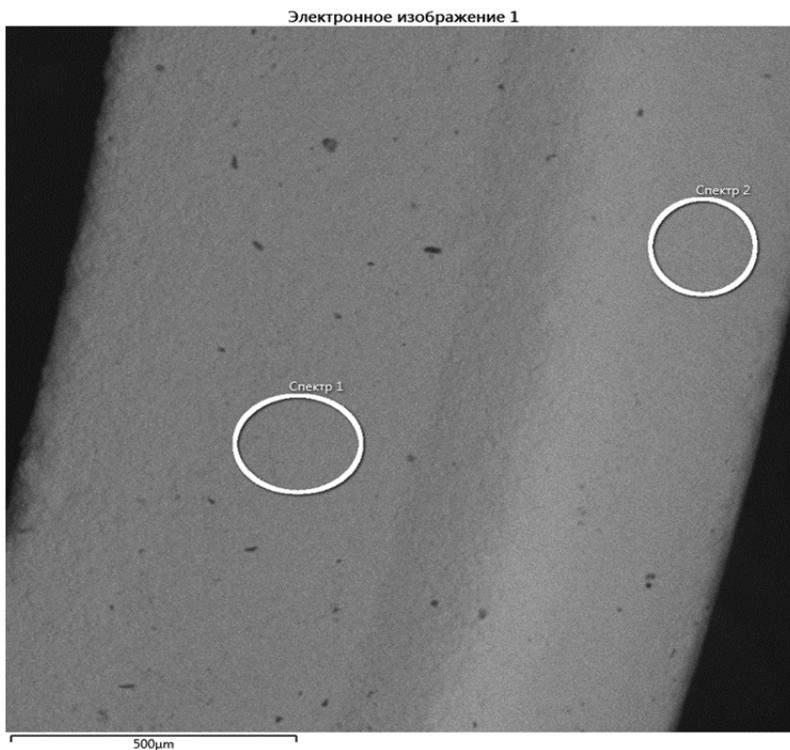
На рис. 3, 4 приведены данные количественного химического анализа поверхности никелевого слоя в зависимости от его толщины.

При толщине слоя менее 1 мкм в его составе обнаружены все элементы, входящие в состав металлизации. Включения черного цвета (рис. 3, спектр 2) с большим содержанием кислорода – оксиды металлов, которые не покрыты никелем. Наличие высокого содержания кислорода показывает, что все эти элементы находятся в виде оксидов. Смачиваемость припоем подобной поверхности весьма затруднительна, существенно возрастает брак по натеканию после пайки. Характерно, что после дополнительного нанесения слоя никеля на качественный слой металлизации пайка обеспечивает вакуумную плотность изделий. Подобную операцию многократно использовали в производственном процессе. Обвязку медной проволокой перед гальванической операцией проводили по возможности плотно и минимум в двух противоположных местах слоя металлизации с контролем электрического контакта мультиметром.



Название спектра	O	Si	Cl	K	Ca	Cr	Ni	Mo	Сумма
Спектр 1	28.36	2.03	0.72	0.76	0.36	0.66	51.26	15.84	100.00
Спектр 2	51.02	1.84	1.29	1.46	0.45		32.67	11.28	100.00
Спектр 3	37.63	0.86	0.30			0.28	47.74	13.19	100.00

Рис. 3. Химический состав поверхности слоя никеля при его толщине 1 мкм и менее



Название спектра	Ni	Сумма
Спектр 1	100.00	100.00
Спектр 2	100.00	100.00

Рис. 4. Химический состав поверхности слоя никеля при его толщине 3 мкм и более

Цилиндрические керамические детали металлизуются по торцевым поверхностям, но, как показал фрактографический анализ, толщина слоя никеля в некоторых случаях существенно отличается: от 0,3 мкм на одной поверхности и до 4 мкм – на противоположной. Причина разной толщины никеля – неудовлетворительный контакт медной проволоки, применяющейся при гальваническом нанесении никеля, с поверхностью окисленного слоя металлизации.

После нанесения слоя никеля детали подвергаются термообработке, режимы которой у разных производителей существенно отличаются. Это и просто сушка изделий при 300 °С в сушильных шкафах без защитной атмосферы и в среде водорода при 800 °С. На рис. 5 приведен количественный анализ поверхности слоя никеля с толщиной 1,5–2 мкм после высокотемпературной обработки. В слое никеля обнаружено существенное количество молибдена при полном отсутствии кислорода. Характерно, что при толщине слоя более 3 мкм после такой термообработки молибден полностью отсутствует. Следует отметить, что единственным способом контроля толщины слоя никеля в процессе его нанесения является капельный метод, который дает большую погрешность. Кроме того, этот метод можно использовать только на образцах-свидетелях, что не обеспечивает 100 % контроль всей покрываемой партии деталей.

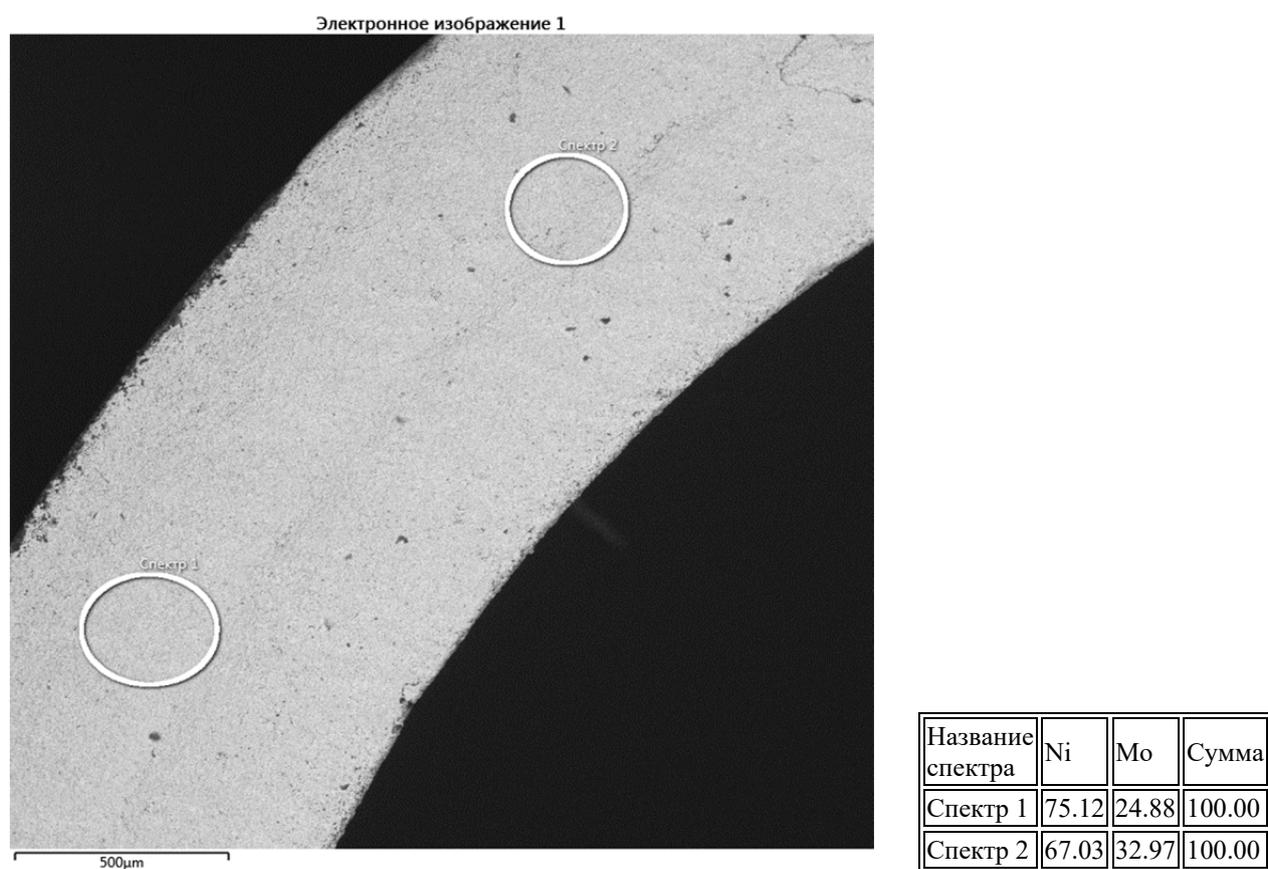


Рис. 5. Химический состав поверхности слоя никеля при его толщине 1,5–2 мкм

Заключение

Таким образом, для обеспечения вакуумноплотного спая керамики с металлической арматурой ВКУ содержание кислорода в слое металлизации не должно превышать 30 %, металлизированный слой в пределах 20–35 мкм, а толщина никелевого слоя – не менее 3 мкм. При нанесении слоя никеля следует уделять особое внимание контакту медной проволоки со слоем металлизации.

Библиографический список

1. Рот, А. Вакуумные уплотнения / А. Рот. – М. : Энергия, 1971. – 195 с.
2. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб., 2014. – 480 с.

3. *Естифеев, Е. Р.* Преимущество печатных плат на металлической основе / Е. Р. Естифеев, В. А. Трусов, М. М. Кирдяев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 292–294.
4. *Масленникова, Г. Н.* Технология электрокерамики / Г. Н. Масленникова, Ф. Я. Харитонов, Н. С. Костюков, К. С. Пирогов. – М. : Энергия, 1994. – 257 с.
5. *Масленникова, Г. Н.* Технологический расчет в керамике / Г. Н. Масленникова, Ф. Я. Харитонов, И. А. Дубов. – М. : Стройиздат, 1994. – 327 с.

Дерябин Денис Викторович

директор по производству,
начальник научно-производственного комплекса
по направлению вакуумных конденсаторов
и коммутирующих устройств,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440060, Россия, г. Пенза ул. Каракозова, 44)
Email: iko-intruder@rambler.ru

Алимова Елена Александровна

инженер-метролог,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440060, Россия, г. Пенза ул. Каракозова, 44)
Email: alimova_ae@mail.ru

Смирнов Геннадий Алексеевич

кандидат технических наук,
ведущий инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440060, Россия, г. Пенза ул. Каракозова, 44)
Email: sga20@kbtech.ru

Шульгин Александр Владимирович

ведущий инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440060, Россия, г. Пенза ул. Каракозова, 44)
Email: hron85@rambler.ru

Ольховой Алексей Александрович

начальник технологического бюро,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440060, Россия, г. Пенза ул. Каракозова, 44)
Email: aleksey.ol.@mail.ru

Deryabin Denis Viktorovich

director for manufacturing,
head of scientific and manufacturing complex
in the direction of vacuum capacitors
and switching devices,
Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440060, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

Alimova Elena Aleksandrovna

engineer-metrologist,
Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440060, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

Smirnov Gennadiy Alekseevich

candidate of technical sciences,
leading engineer-technologist,
Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440060, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

Shulgin Aleksandr Vladimirovich

lead design engineer,
Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440060, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

OI'khovoy Aleksey Aleksandrovich

head of technological bureau,
Scientific Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440060, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

УДК 620.179.119

Качество слоя металлизации керамики марок ВК94, ВК95 / Д. В. Дерябин, Е. А. Алимова, Г. А. Смирнов, А. В. Шульгин, А. А. Ольховой // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 55–60. – DOI 10.21685/ 2307-4205-2018-2-7.

Р. Л. Семенихин

ПРОЦЕСС ПРОВОРАЧИВАНИЯ ВКЛАДЫША СФЕРИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА НАКОНЕЧНИКА ДЕМПФЕРА НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА И ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ

R. L. Semenikhin

THE PROCESS OF TURNING THE INSERT WITH THE SPHERICAL BEARING END OF THE DAMPER BEARING SCREW OF THE HELICOPTER AND ITS PREVENTION

Аннотация. *Актуальность и цели.* В статье разработана математическая модель часто возникающей в эксплуатации неисправности несущей системы вертолета – проворачивание вкладыша сферического подшипника наконечника демпфера несущего винта вертолета, которое обнаруживается визуально по смещению метки, нанесенной на вкладыш подшипника и корпус наконечника демпфера. *Материалы и методы.* Математическая модель разработана на основе анализа вибрационного воздействия на корпус наконечника демпфера, принимая во внимание, что рассматриваемая система максимально нагружена в состоянии близком к возникновению земного резонанса. Данная модель показывает, что ведущую роль в этом процессе играет коэффициент трения в подшипнике. С увеличением этого коэффициента до критического значения и появляется данная неисправность. Причиной увеличения коэффициента трения в подшипнике является обеднение смазки с наработкой изделия. Процесс обеднения смазки с наработкой изделия необратим для широко применяемых в настоящее время в конструкции вертолетов наконечников демпферов несущего винта, имеющих сферические подшипники, не требующие смазки в эксплуатации. С целью повышения надежности несущей системы и исключения появления проворачивания вкладыша сферического подшипника в статье рассматривается возможность использования наконечников демпферов несущего винта, требующих периодической смазки в эксплуатации. Для выбора наиболее подходящего наконечника демпфера несущего винта из имеющих одинаковые характеристики по нагрузкам предложены и научно обоснованы новые коэффициенты, оценивающие эффективность и рентабельность этих изделий. *Результаты и выводы.* Результаты, полученные в работе, могут быть рекомендованы разработчикам вертолетов для проектирования несущих систем вертолетов и для доработок в эксплуатации с помощью внедрения обязательных сервисных бюллетеней.

Abstract. *Background.* There is the mathematical model developed in this article for often appeared malfunction of helicopter main rotor – helicopter main rotor damper rod end spherical bearing rotation, which is detected visually by misalignment of the mark on the outer race of bearing and the damper rod end. *Materials and methods.* The mathematical model is developed on basic vibration impact to the damper rod end, taking into account that the considering system is maximally loaded in condition close to origin of ground resonance. This model shows that lead role in this process has the coefficient of friction inside the bearing. When this coefficient increases till its critical meaning, that malfunction appears. The coefficient of friction inside the bearing increases because of the lubricant depletes during the part operates. The process of the lubricant depletion during the operation is irreversible for wide using at this time the main rotor rod ends with spherical bearings which don't require periodical lubrication. In order to improve reliability of helicopter main rotor and exclusion spherical bearing rotation, in this article considered the possibility to use main rotor rod ends which require periodical lubrication during operation. In order to select the most suitable main rotor rod end from items having the same load characteristics, new coefficients were proposed and scientifically substantiated to evaluate the efficiency and profitability of these parts. *Results and conclusions.* The results of the work could be recommended to helicopter design organizations for designing of main rotors and modifying of main rotors in operation by mandatory service bulletin issuing.

Ключевые слова: несущий винт, вертолет, демпфер несущего винта, сферический подшипник, математическая модель, проворачивание вкладыша подшипника.

Key words: Main rotor, helicopter, main rotor damper, spherical bearing, mathematical model, bearing rotation.

Введение

Несущая система вертолета (лопасти, втулка с демпферами несущего винта (НВ)) является важнейшей системой вертолета, отказы и неисправности которой непосредственно влияют на безопасность полетов. Поэтому к надежности этой системы применяются самые высокие требования.

Проворачивание вкладыша подшипника в корпусе наконечника демпфера несущего винта вертолета – одна из наиболее часто возникающих неисправностей несущей системы вертолетов в эксплуатации. Данная неисправность легко обнаруживается визуально по смещению метки, нанесенной на вкладыш подшипника и корпус наконечника демпфера несущего винта. Однако устранение данной неисправности трудоемко, так как требует замены наконечника демпфера НВ путем демонтажа и обратного монтажа всего демпфера НВ в сборе.

Причиной такой неисправности может быть нарушение допусков и посадок при изготовлении наконечников демпфера, но наиболее вероятной причиной является обеднение смазки подшипника в эксплуатации. Это приводит к увеличению сил трения вплоть до проворачивания вкладыша.

Постановка задачи

Рассмотрим широко применяемые на современных вертолетах втулки НВ с эластомерным подшипником (рис. 1). Эластомерный подшипник 1 здесь заменяет три шарнира: осевой, вертикальный и горизонтальный. Как правило, в таких втулках корпус демпфера НВ 2 крепится к корпусу втулки 3, а наконечник демпфера 4 – к узлу крепления лопасти НВ 5.

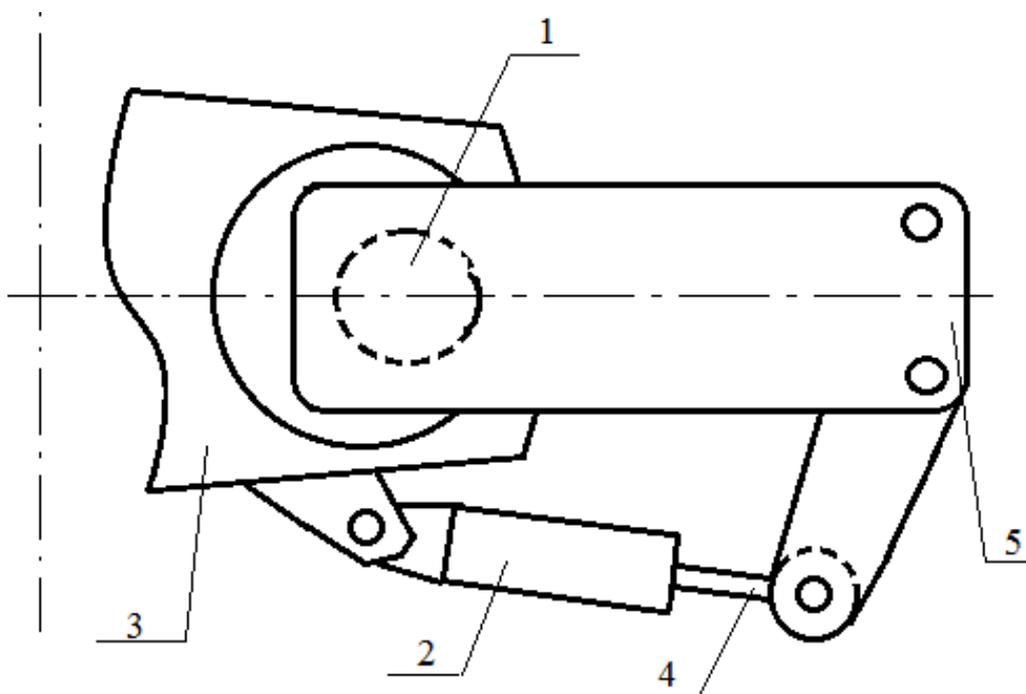


Рис. 1. Схема рассматриваемой втулки несущего винта

В этой схеме наиболее широко применяются подшипники, установленные в наконечниках демпферов НВ вертолетов, относящиеся к типу, которые не требуют техобслуживания (смазывания) в процессе эксплуатации.

Разработаем математическую модель данного процесса на основе анализа вибрационного воздействия на корпус наконечника демпфера, для чего составим уравнение движения подшипника наконечника демпфера несущего винта.

Построение модели

Пусть входным процессом (рис. 2) будет смещение кронштейна 3 лопасти несущего винта, а выходным – смещение метки 4 вкладыша 2 подшипника относительно корпуса наконечника 1.

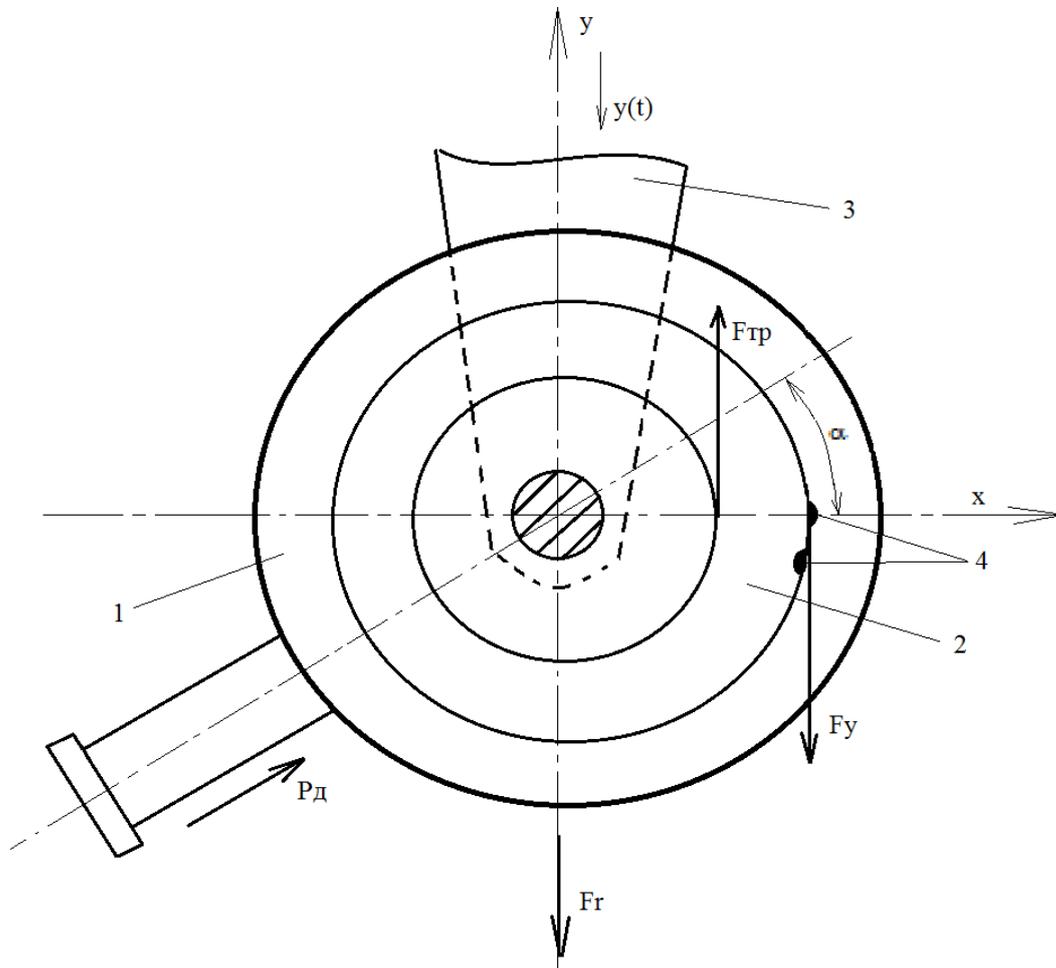


Рис. 2. Схема процесса проворачивания вкладыша сферического подшипника в корпусе наконечника демфера несущего винта

Здесь $y(t)$ – вибрационное воздействие от лопасти несущего винта; F_α – сила, стремящаяся повернуть вкладыш подшипника в корпусе демфера НВ; P_d – демпфирующая сила; F_r – радиальная сила в подшипнике; $F_{тр}$ – сила трения в подшипнике; F_y – сила, стремящаяся повернуть вкладыш подшипника в корпусе демфера НВ.

Опираясь на один из основных законов механики, согласно которому сумма всех сил, приложенных к подшипнику, равна нулю, с учетом осей x и y получим уравнение движения

$$P_d \cos \alpha + P_d \sin \alpha + F_{тр} = F_y + F_r. \quad (1)$$

Радиальная сила, действующая на подшипник, определяется по формуле [1]

$$F_r = p_m(ID), \quad (2)$$

где p_m – условное среднее давление в подшипнике; ID – площадь проекции цапфы на плоскость параллельную оси.

Так как наиболее интенсивная работа демферов НВ происходит при возникновении самовозбуждающихся колебаний вертолета – земного резонанса, который, как правило, возникает при рулении, взлете и посадке вертолета, то колебания лопасти относительно вертикального шарнира (ВШ),

в нашем случае это входной процесс $x(t)$, характеризуются амплитудой первой гармоники θ , которая определяется по формуле [2]

$$\theta = \frac{a_0 \sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{1 - \nu_0^2}, \tag{3}$$

где a_0 – угол конусности; a_1 и b_1 – коэффициенты махового движения на указанных выше режимах работы винта; ν_0 – безразмерный коэффициент лопасти. Амплитуда θ принимается равной 0,5...1, так как при этом значении появляется возможность возникновения земного резонанса, при котором рассматриваемая система наиболее нагружена.

Демпфирующая сила равна силе гидравлического сопротивления Q и определяется по формуле [2]

$$P_d = Q = k_\Gamma \frac{\rho F^3}{2s^2} V_{шт}, \tag{4}$$

где k_Γ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ – плотность жидкости; F – площадь поршня, вытесняющая жидкость; s – площадь проходного отверстия противоперегрузочного клапана, $V_{шт}$ – скорость штока, определяемая по формуле [2]

$$V_{шт} = \frac{4\theta l_d}{57,3T}, \tag{5}$$

где l_d – плечо крепления демпфера; T – период колебания штока.

Сила трения:

$$F_{тр} = fF_r, \tag{6}$$

где f – коэффициент трения в подшипнике.

Таким образом, с учетом (2)–(6), преобразовывая уравнение (1), получим

$$F_y = k_\Gamma \frac{0,035\rho F^3 \theta l_d}{s^2 T} (\cos \alpha + \sin \alpha) + p_m(lD)(f - 1).$$

На рис. 3 изображен аналитический график, представляющий линейную функцию зависимости силы, стремящейся повернуть вкладыш подшипника в корпусе демпфера НВ от коэффициента трения в подшипнике.

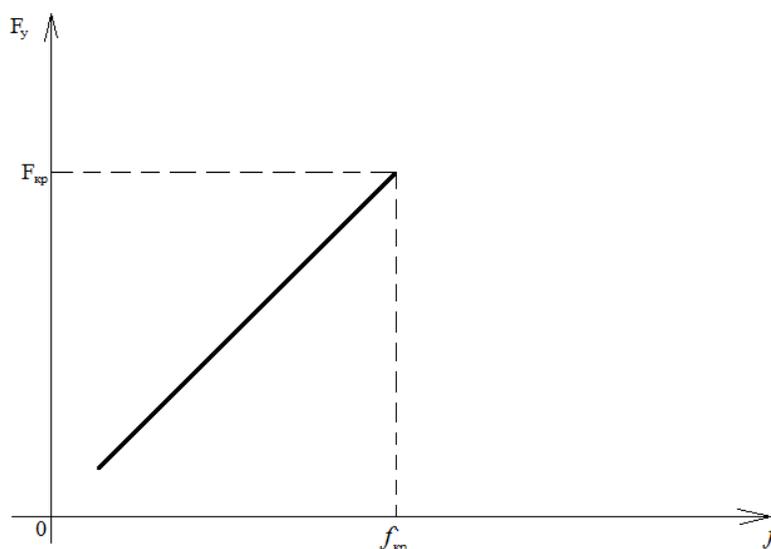


Рис. 3. Характеристика зависимости силы, стремящейся повернуть вкладыш подшипника в корпусе демпфера НВ от коэффициента трения в подшипнике

Как было сказано выше, рассматриваемые подшипники не требуют техобслуживания (смазки) в эксплуатации, и очевидно, что смещение метки, нанесенной на вкладыш подшипника и корпус наконечника демпфера НВ, происходит по достижению некоторого критического значения коэффициента трения $f_{кр}$. Причиной достижения этого критического значения является обеднение смазки, которое необратимо для исследуемых подшипников. Таким образом, критическое значение силы $F_{кр}$, при котором произойдет смещение метки, будет иметь вид

$$F_{кр} = \lim_{f \rightarrow f_{кр}} \left\{ k_f \frac{0,035 \rho F^3 \theta l_D}{s^2 T} (\cos \alpha + \sin \alpha) + p_m (lD)(f - 1) \right\}.$$

Меры по предотвращению проворачивания вкладыша сферического подшипника наконечника демпфера несущего винта

Основным способом для решения проблемы постепенного обеднения смазки и увеличения коэффициента трения в подшипнике до критического значения и, соответственно, повышения надежности несущей системы вертолета, может стать применение наконечников демпферов НВ, требующих регулярной смазки в эксплуатации при выполнении периодических форм техобслуживания.

Но, как известно, любые типы изделий имеют свои преимущества и недостатки. С целью выбора наиболее подходящего наконечника демпфера НВ с подшипником для эксплуатации на вертолетах какого-либо конкретного типа необходимо оценить наибольшую эффективность эксплуатации данного изделия.

Для этого предложим следующие коэффициенты оценки эффективности эксплуатации данного изделия (на примере вертолета). Пусть имеется n типов наконечников с подшипниками, имеющими одинаковые характеристики по нагрузке, тогда

$$K_{Э1} = \left(\frac{S(R)_{пр}^*}{S_{ц1} + S_{тр1} + S_{т1} + S_{зам1} + S_{об1} \left(\frac{R}{T_{об}} \right)} \right) P(t)_1;$$

$$K_{Э2} = \left(\frac{S(R)_{пр}^*}{S_{ц2} + S_{тр2} + S_{т2} + S_{зам2} + S_{об2} \left(\frac{R}{T_{об}} \right)} \right) P(t)_2;$$

$$K_{Эn} = \left(\frac{S(R)_{пр}^*}{S_{цn} + S_{трn} + S_{тn} + S_{замn} + S_{обn} \left(\frac{R}{T_{об}} \right)} \right) P(t)_n, \quad (7)$$

где $S(R)_{пр}^*$ – ожидаемая прибыль от эксплуатации вертолета в течение ресурса наконечника демпфера НВ; $S_{ц1}, S_{ц2}, \dots, S_{цn}$ – стоимость 1-го, 2-го, ..., n -го наконечника демпфера НВ; $S_{тр1}, S_{тр2}, \dots, S_{трn}$ – стоимость транспортных расходов на доставку 1-го, 2-го, ..., n -го наконечника демпфера НВ; $S_{т1}, S_{т2}, \dots, S_{тn}$ – стоимость таможенных расходов на доставку 1-го, 2-го, ..., n -го наконечника демпфера НВ; $S_{зам1}, S_{зам2}, \dots, S_{замn}$ – стоимость замены 1-го, 2-го, ..., n -го наконечника демпфера НВ; $S_{об1}, S_{об2}, \dots, S_{обn}$ – стоимость обслуживания (смазывания) 1-го, 2-го, ..., n -го наконечника демпфера НВ; $T_{об}$ – периодичность обслуживания (смазывания) наконечника демпфера НВ; $P(t)_1, P(t)_2, \dots, P(t)_n$ – вероятность безотказной работы 1-го, 2-го, ..., n -го наконечника демпфера НВ.

Периодичность обслуживания (смазывания) наконечника демпфера НВ $T_{об}$ для конкретного типа вертолета может быть задана с помощью MSG-3 анализа применительно к изделиям вертолетов [3].

Для подшипников, не требующих смазки в эксплуатации, уравнение (7) примет следующий вид:

$$K_{Эn} = \left(\frac{S(R)_{\text{пр}}^*}{S_{\text{цп}} + S_{\text{трп}} + S_{\text{тп}} + S_{\text{замп}}} \right) P(t)_n.$$

Таким образом, наиболее эффективным для эксплуатации будет наконечник демпфера НВ, для которого выполняется следующее условие:

$$K_{Э} = \max(K_{Э1}, K_{Э2}, \dots, K_{Эn}).$$

Заключение

1. Полученная математическая модель процесса проворачивания вкладыша подшипника в корпусе наконечника демпфера НВ вертолета подтверждает происхождение данного процесса по причине повышения коэффициента трения в подшипнике до критического значения вследствие постепенного обеднения смазки.

2. Этот процесс возможно предотвратить с помощью замены в конструкции несущей системы наконечника демпфера НВ, не требующего смазки в эксплуатации, на наконечник демпфера НВ, требующий периодического смазывания в эксплуатации.

3. В свою очередь данные наконечники могут иметь определенные недостатки и оказаться неэффективными и нерентабельными. Для оценки этой эффективности и сравнения полученных результатов между наконечниками демпфера НВ с различными типами подшипников предложены новые коэффициенты.

Библиографический список

1. Горбатюк, С. М. Детали машин и основы конструирования / С. М. Горбатюк, А. Н. Веремеевич, С. В. Албул, И. Г. Морозова. – М. : МИСиС, 2014. – 424 с.
2. Сохань, О. Н. Конструирование втулок несущих винтов вертолетов / О. Н. Сохань. – М. : Московский авиационный институт, 1981. – 56 с.
3. Пивоваров, В. А. Рекомендации по установлению ресурсов вертолету Ми-2 / В. А. Пивоваров, Р. Л. Семенихин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 179. – С. 107–113.

Семенихин Роман Леонидович

кандидат технических наук,
инженер по сопровождению
эксплуатации вертолетов,
АО «Хеливерт»
(140070, Россия, Московская область, Люберецкий
район, пос. Томилино, ул. Гаршина, 26/3)
E-mail: airroman1980@gmail.com

Semenikhin Roman Leonidovich

candidate of technical sciences,
product support engineer,
JSC "Helivert"
(140070, 26/3 Garshina street, Tomilino village,
Lyuberetsky district, Moscow region, Russia)

УДК 629.7.026.56

Семенихин, Р. Л.

Процесс проворачивания вкладыша сферического подшипника наконечника демпфера несущего винта вертолета и его предотвращение / Р. Л. Семенихин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 61–66. DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-8.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 351/354

DOI 10.21685/ 2307-4205-2018-2-9

С. М. Головнин

РИСК ПОТЕРИ НАВЫКА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПИЛОТАМИ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

S. M. Golovnin

THE RISK OF LOSING THE PROBLEM SOLVING SKILLS IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY BY PILOTS CIVIL AVIATION

Аннотация. Статья посвящена проблеме человеческого фактора в пилотировании и влиянию тренировок курсантов (начинающих пилотов) на безопасность полетов. Рассматривается значимость упражнений, о которых заведомо не известно курсантам в процессе тренировки, их влияние на общую подготовку и скорость принятия решений пилотами гражданской авиации. Приводятся результаты моделирования тренировки курсантов с учетом неожиданных для них упражнений в виртуальной среде пилотирования, рассматриваются риски потери навыка решения проблем в условиях неопределенности с учетом влияния человеческого фактора на безопасность полетов и процесс подготовки курсантов гражданской авиации. Рассматриваются основные тренды в процессе подготовки пилотов гражданской авиации и приводится теоретическое обоснование результатов моделирования ситуации с помощью виртуальной среды пилотирования. Результаты исследования приводятся в графическом виде для наглядного отображения результатов и вероятных последствий с использованием статистического прогнозирования. Приводится статистика распределения факторов опасности по трем основным составляющим человек-

Abstract. The article is devoted to the human factor problem and the impact of training of cadets (novice pilots) on flight safety. The importance of exercises, which the cadets are not aware of during the training process, their influence on the overall training and speed of decision making by civil aviation pilots is considered. The results of simulation of training of cadets in view of unexpected exercises for them in the virtual piloting environment are presented, the risks of loss of the problem solving skills in the conditions of uncertainty are considered, taking into account the human factor influence on flight safety and the process of training civil aviation cadets. The main trends in the process of training civil aviation pilots are considered and the theoretical justification of the simulation results of the situation with the help of a virtual piloting environment is given. The results of the study are presented in a graphical form for visualizing the results and probable consequences using statistical forecasting. The statistics of the distribution of hazards by the three main components of man-machine-environment and the explanation of statistical indicators for these areas in the past decades in civil aviation are given. Mention is made of the possibility and importance of working off contingencies on aircraft using a virtual piloting environment,

машина-среда и объяснение статистических показателей по данным направлениям за прошедшие десятилетия в гражданской авиации. Упомянется о возможности и важности отработки нештатных ситуаций на воздушных судах с помощью виртуальной среды пилотирования, когда риск реального нанесения ущерба сведен к минимуму. Приводится формула расчета вероятности совершения ошибок пилотами гражданской авиации в процессе выполнения полетов на воздушных судах и варианты увеличения уровня и культуры безопасности полетов путем корректировки программ подготовки авиационных специалистов. Выводы и рекомендации статьи предполагается внедрять в программы подготовки специалистов гражданской авиации в перспективе с ориентацией на управленческие риски, возникающие в процессе управления организациями, являющимися элементами авиатранспортной системы с целью улучшения качества услуг в сфере гражданской авиации и безопасности полетов. Результаты внедрения будут подробно отражены в последующих статьях.

Ключевые слова: безопасность полетов, управление рисками, управление качеством, виртуальная среда, подготовка авиационных специалистов, моделирование полетов, человеческий фактор в ГА.

where the risk of actual damage is minimized. A formula is given for calculating the probability of errors committed by civil aviation pilots in the process of performing flights on aircraft and options for increasing the level and safety culture of flights by adjusting training programs for aviation specialists. The conclusions and recommendations of the article are expected to be introduced into training programs for civil aviation specialists, in the future, with a focus on management risks arising in the management of organizations that are elements of the air transport system in order to improve the quality of services in the field of civil aviation and flight safety. The results of the implementation will be detailed in subsequent articles.

Key words: safety of flights, risk management, quality management, virtual environment, training of aviation specialists, modeling of flights, human facts in civil aviation.

Введение

Современная авиатранспортная система характеризуется большой зависимостью от человека, безопасное функционирование всех ее элементов напрямую определяет тот самый «человеческий фактор», играющий большую роль в управлении и стабильности всей системы (рис. 1). С течением времени и развитием авиационной промышленности роль человеческого фактора в авиационных происшествиях в значительной степени изменяется, и, если на первых ВС, которые вызывали сложности в управлении, а также в силу их ненадежности доля человеческого фактора составляла 5–7 %, в середине прошлого века – примерно 50 %, то в настоящее время доля человеческого фактора составляет около 80 % с тенденцией к увеличению. Можно предположить, что через 30 лет доля человеческого фактора будет составлять 90–95 % [1].

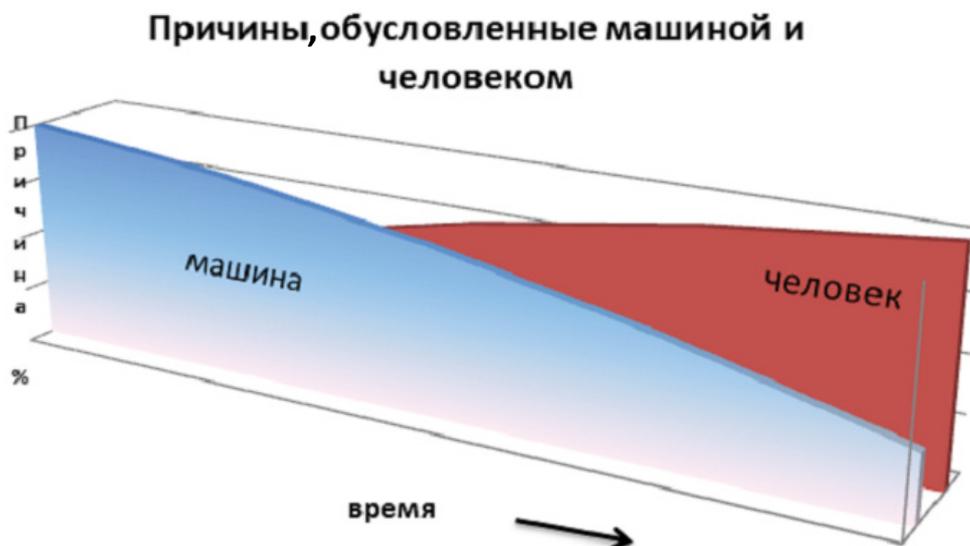


Рис. 1. Развитие роли человеческого фактора в авиатранспортной системе

Этот процесс закономерный как в нашей стране, так и во всем мире и объясняется следующим:

- начало XX в.: количество авиационных происшествий – неблагоприятные внешние условия, технические причины и человеческий фактор;
- середина XX в.: количество летных происшествий растет, неблагоприятные внешние условия, человеческий и технический фактор;
- начало XXI в.: технический фактор, неблагоприятные внешние условия, человеческий фактор.

По концепции ИКАО человеческий фактор – это люди в той обстановке, в которой живут и трудятся, взаимодействуют с техникой, с другими людьми, с окружающей средой и документацией. В целом же деятельность человека всегда характеризуется некоей степенью неопределенности, предугадать действия, последствия и варианты решения невозможно, особенно в ограниченный промежуток времени.

Человеческий фактор как причина авиационного события подразумевает под собой неспособность человека своевременно среагировать (вмешаться) в создавшейся аварийной ситуации с целью избежания или минимизации последствий этого события [2].

Одной из важнейших характеристик человека является время его реакции. В общем виде время реакции – это время, которое проходит от начала появления раздражителя до окончания двигательного ответа. В гражданской авиации способность реагировать на раздражители (сигналы, команды УВД, ситуации в кабине ВС) прививается на ранних этапах обучения в летных школах. Однако практическая отработка реакций на события, несомненно, играет важную роль в развитии скорости реакции в условиях выполнения реальных полетов.

Для этой цели программы обучения курсантов включают в себя задания на тренировку с перечнем событий, которые отрабатываются на тренажерах и подразумевают возникновение правильной реакции у курсанта для избежания развития аварийной ситуации.

Однако, проводя занятия с курсантами, которые вводятся в строй на новый тип ВС после окончания обучения в летной школе, было замечено, что в случае проведения серии однотипных тренировок курсанты начинают предугадывать ситуацию, которая будет задаваться инструктором тренажера и развиваться в процессе проведения тренировок.

Почему так происходит?

Программа подготовки курсантов предусматривает типовые упражнения и ситуации на тренажере, которые должны быть отработаны. Данный перечень утверждается в компаниях и учебных заведениях. Это хорошая, рекомендованная практика соблюдения требований законодательства. Курсанты и начинающие пилоты всегда могут ознакомиться с заданием на тренировку и быть готовы к развитию различных сценариев. Конечно, в подобных заданиях на тренировку существует доля упражнений и ситуаций, которые задаются инструктором неожиданно. Но и тут присутствует вероятность появления закономерностей и предугадывания курсантом событий. К примеру, было выявлено, что упражнение «пожар одного двигателя» всегда включается при ясной погоде и в условиях незначительного ветра (CAVOK). Поэтому когда после выполнения упражнений по взлету и посадке в условиях сильно ограниченной видимости инструктор задает отличные погодные условия, пилоты, находящиеся на тренажере, объявляют друг другу, что, вероятно, сейчас будет упражнение с отказом двигателя [3, 4].

Таким образом пропадает эффект «неожиданности», а ведь отказы или прочие сложные ситуации, которые могут возникнуть в полете, невозможно предсказать в условиях реального полета.

Данная закономерность и предугадывание возможного сценария развития ситуации в полете способны существенно притупить у пилота навык реагирования и решения неожиданно возникающих проблем и снизить потребность в анализе и верном принятии решений относительно той или иной ситуации. Как следствие – основной навык пилота «лететь впереди самолета на несколько секунд» будет размыт и впоследствии останется без развития, что скажется на дальнейшей безопасной эксплуатации воздушных судов.

Моделирование и анализ проблемы

Виртуальная среда пилотирования характеризуется современными разработками в области искусственного интеллекта, что позволяет на сегодняшний день задать случайно время отказа/возникновения сложной ситуации, в том числе случайный выбор ситуации из широкого перечня.

Для того чтобы сузить временные рамки возникновения ситуации и сценария ее развития, существует возможность задать временные рамки, к примеру с четвертой по восьмую минуту полета, или на высоте от 200 до 1400 футов, или при захвате глиссадного луча при выполнении посадки.

Однако подготовить человека к действию в неопределенной ситуации, развить навыки поиска решения проблем возможно, смоделировав условия неопределенности в процессе проведения тренировок. Действия в условиях неопределенности заставляют пилота искать варианты решения, предугадывать последствия принятых решений и оценивать огромное количество информации в достаточно сжатые промежутки времени. В данном контексте неопределенность понимается как «отсутствие информации о вероятности наступления авиационного события», иными словами, моделируется ситуация, когда пилот не может оценить вероятность наступления события и поиск решения по устранению последствий события будет происходить в режиме реального времени [5, 6].

Классическая формула вероятности события выглядит следующим образом: $V = \frac{n}{M}$, где V – вероятность; n – количество событий; M – единица измерения времени, например количество летных часов или количество полетов. В процессе выполнения тренировки значение M известно и задано продолжительностью тренировки. Значение n зачастую также известно из задания на тренировку, и пилоты, изучая программу подготовки, уже понимают, сколько событий и какого рода будут возникать в процессе тренажерной подготовки. Для того чтобы сделать переменную V неизвестной, что, как следствие, сделает вероятность наступления события неизвестной, необходимо сделать неизвестной переменную n , для того, чтобы количество и характер событий был не известен для пилотов.

Моделирование

Для моделирования подобной ситуации с курсантами на тренажере был проведен следующий эксперимент: 10 курсантов проходили в общей сложности 20 тренировок, из них в 10 тренировках они знали, что будет запланировано моделирование столкновения с птицей (имитация разбитого остекления), а в 10 других случаях в задании на тренировку не было обозначено, что планируется отработка столкновения с птицей. Результаты фиксировались следующим образом: фиксировались номер тренировки и количество человек, которые не смогли правильно выполнить процедуры при столкновении с птицей (имитация разбитого остекления).

Условия тренировки: модель ВС Cessna 172, погода: штиль, CAVOK (видимость без ограничений), дневное время суток, в каждой тренировке столкновение имитировалось в случайный отрезок времени полета по кругу (курсант не знал, когда и на каком этапе произойдет столкновение).

В первую очередь выполнялись тренировки с условием, что курсанты не знают, что в тренировке будет имитация столкновения, результаты выглядели следующим образом:

Номер тренировки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество курсантов, допустивших ошибку ¹	10	8	7	8	9	6	4	3	2	2

Таким образом, наблюдается тенденция снижения количества человек, допустивших ошибку в пилотировании. Это объясняется адаптацией курсантов к ситуации и концентрацией внимания, а также привлечением внутренних резервов знаний и уже полученного опыта, более последовательными действиями по устранению последствий ситуации.

Во вторую очередь выполнялись тренировки с условием, что курсанты знают, что в тренировке будет имитация столкновения, результаты выглядели следующим образом:

Номер тренировки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество курсантов, допустивших ошибку	4	3	2	0	3	5	6	8	8	10

Таким образом, наблюдается обратная тенденция увеличения количества человек, допустивших ошибку в пилотировании. Это объясняется расслабленным состоянием курсанта, считающего, что все под контролем и обязательно удастся справиться с аварийной ситуацией. Дальнейший рост количества ошибок объясняется возросшим стрессом по поводу того, что даже, несмотря на то, что курсант заранее знает о проблеме, он не может с ней справиться, так как его знания и навыки не применяются в силу психологической уверенности в том, что ситуация полностью под контролем и она запланирована. Также наблюдается рассеянное внимание с увеличением числа тренировок.

¹ Под ошибкой подразумевается неспособность курсанта посадить ВС благополучно.

Обобщенные результаты эксперимента представлены на графике, содержащем линии тренда, наглядно демонстрирующие как элемент неожиданности события позволяет снизить количество ошибок, побуждая курсанта акцентировать внимание на пилотировании и выполнении процедур.

На рис. 2 показано:

– зеленая линия – моделирование ситуации, когда курсанты НЕ знают о предстоящем столкновении; пунктирная линия – линия тренда;

– красная линия – моделирование ситуации, когда курсанты знают о предстоящем столкновении; пунктирная линия – линия тренда.

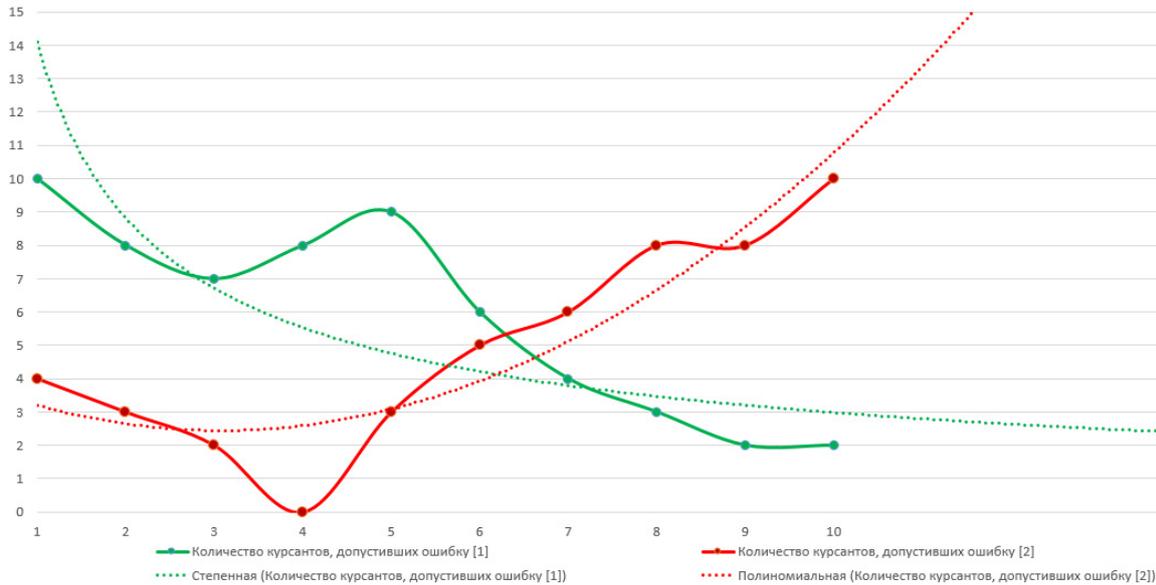


Рис. 2. Результаты моделирования

Как видно из графика, линии тренда показывают прогресс в обоих случаях – в случае неожиданного введения моделирования столкновения количество курсантов, выполнивших тренировку с ошибкой, стремится к нулю, в то время как условия во втором эксперименте показывают тенденцию увеличения количества ошибок.

Таким образом, следуя линиям тренда, заметна положительная тенденция включения в тренировку упражнений, о которых курсанты не осведомлены заранее.

Заключение

Благодаря моделированию условий неопределенности в виртуальном пространстве (тренажер, симулятор) данные навыки можно развивать на земле, готовя пилота к действиям практически в любой ситуации, причем не важно, будет ли причиной ситуации человек, машина или среда. Навыки действия в условиях неопределенности в любом случае будут помогать пилотам принять верное решение и своевременно устранить возникшую проблему.

С учетом вышеизложенного в условиях, когда все больше успешное завершение полета зависит от человека, считаем, что включение в программы тренажерной подготовки неожиданных сложных ситуаций, связанных с анализом и принятием решений экипажем, совершенно необходимо. Включение в программы подготовки летного состава отработки непредвиденных ситуаций (с эффектом неожиданного возникновения) положительно отразится на готовности экипажа воздушного судна оценивать ситуацию и принимать верные решения и, как следствие, улучшить показатели безопасности полетов.

Библиографический список

1. Овчаров, В. Е. «Человеческий фактор» в авиационных происшествиях : метод. материалы / В. Е. Овчаров. – М. : АВИКОС страховое общество, 2005. – 80 с.

2. *Плотников, Н. И.* Исследование состоятельности концепции «человеческого фактора» / Н. И. Плотников // Безопасность полетов. – 2011. – URL: [http://flightcollege.com.ua/library/ 3_ТЕХНИКА_И_ТЕХНИЧЕСКИЕ_НАУКИ/39_ТРАНСПОРТ/39.5_ВОЗДУШНЫЙ_ТРАНСПОРТ/ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ%20ФАКТОР/article02.pdf](http://flightcollege.com.ua/library/3_ТЕХНИКА_И_ТЕХНИЧЕСКИЕ_НАУКИ/39_ТРАНСПОРТ/39.5_ВОЗДУШНЫЙ_ТРАНСПОРТ/ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ%20ФАКТОР/article02.pdf)
3. *Юрков, Н. К.* Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21.
4. *Юрков, Н. К.* Безопасность сложных технических систем / Н. К. Юрков // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 129–134.
5. Оценка свойств живучести, надежности и безопасности простейших топологических структур / Н. Ж. Мусин, А. И. Годунов, Б. Ж. Куатов, Е. С. Каракулов, Н. К. Юрков // XXI ВЕК: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Спецвыпуск. – 2012. – Вып. 1. – С. 118–124.
6. *Горячев, Н. В.* Опыт применения систем сквозного проектирования при подготовке выпускной квалификационной работы / Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В. Г. Белинского. – 2011. – № 26. – С. 534–540.

Головнин Сергей Михайлович

ведущий специалист по сертификации,
АК Волга-Днепр,
аспирант,
Ульяновский институт гражданской авиации
имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева
(432071, Россия, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8)
E-mail: xplane.manual@gmail.com

Golovnin Sergei Mikhailovich

specialist certification,
АК Volga-Dnepr,
postgraduate student,
Ulyanovsk Civil Aviation Institute
named after Chief Marshal of aviation B. P. Bugaev
(432071, 8/8 Mozhayskogo street, Ulyanovsk, Russia)

УДК 351/354**Головнин, С. М.**

Риск потери навыка решения проблем в условиях неопределенности пилотами гражданской авиации / С. М. Головнин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 67–72. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-9.

О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДАВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ КОГНИТИВНОЙ КАРТЫ

O. V. Prokof'ev, A. E. Savochkin

MODELING OF THE DETECTION SYSTEM OF PRE-EMERGENCY SITUATION BASED ON THE FUZZY COGNITIVE MAP

Аннотация. Состояние технически сложного объекта (ТСО) в процессе работы определяется с помощью комплекса параметрических датчиков, позволяющего определять характеристики динамики как внешней среды эксплуатации, так и показателей функционирования самого объекта. Выходные сигналы датчиков могут отображать наличие кратковременных, ступенчатых и прочих нагрузок, изменений в структуре случайной составляющей сигнала, а также позволяют сделать прогноз о приближении режима работы к предаварийной ситуации. Построение системы мониторинга возможно на концептуальной основе нечетких когнитивных карт. Данный подход позволяет не прибегать к усложнению применяемого математического аппарата и проводить имитационное моделирование процесса управления ТСО. Форма реализации системного подхода к проектированию в терминах нечетких когнитивных карт позволяет составить сценарии поведения системы мониторинга и управления, провести оценку информационной ценности выводов по результатам обработки сигналов отдельных датчиков.

Ключевые слова: технически сложный объект, система обнаружения предаварийной ситуации, нечеткая когнитивная карта.

Abstract. The state of a technically complex object (TCO) in the process of operation is determined with the help of a complex of parametric sensors, which makes it possible to determine the characteristics of the dynamics of both the external environment of operation and the performance of the object itself. Output signals of the sensors can show the presence of short-term, step-by-step and other loads, changes in the structure of the random component of the signal, and also make it possible to predict the approach of the operating mode to the pre-emergency situation. The construction of a monitoring system is possible on a conceptual basis of fuzzy cognitive maps. This approach makes it possible not to resort to complicating the applied mathematical apparatus and to carry out simulation simulation of the TCO control process. The form of realization of the system approach to designing in terms of fuzzy cognitive maps allows to make scenarios of the behavior of the monitoring and control system, to evaluate the information value of the conclusions based on the results of processing the signals of individual sensors.

Key words: technically complex object, detection system of pre-emergency situation, fuzzy cognitive map.

Введение

Подготовка к работе ТСО связана с анализом показаний множества параметрических датчиков, выполняющих измерительное преобразование физических величин различной природы. Во время подготовки к режиму работы и в процессе движения объекта проявляется действие объективных условий работы, внешней среды, корректировки задания, которые могут привести к появлению предаварийной ситуации. В выходных сигналах датчиков могут проявляться последствия температурного и временного дрейфа их характеристик, износа аппаратуры, влияния электромагнитных шумов, вибраций, изменения внешней физической среды, оперативной корректировки, пересмотра цели управления ТСО в процессе работы [1, 2]. Привести поступающие потоки информации в единую систему, задать приоритеты или степени значимости того или иного показателя, определить причинно-следственные связи и сделать конечные выводы для управления объектом возможно на основе системного подхода к проектированию. Элементами системы здесь являются не только физические существующие выходные сигналы датчиков, прошедшие аналого-цифровое преобразование, но и виртуальные составляющие: результаты проверки свойств сигналов в программных модулях, результаты выполнения логических правил. Несмотря на виртуальный характер ряда элементов, системный

подход может быть полноценно реализован в модели системы контроля ТСО, так как речь идет об устойчивой структуре с конкретными связями между элементами и возможной оценкой состояния системы. Концепция построения системы контроля служит для обеспечения возможности управления объектом как в режиме поддержки принятия решений, так и в автоматическом режиме.

Постановка задачи и ее практическая значимость

В данной работе была поставлена цель построения модели, отражающей процесс контроля работы ТСО с возможностью предсказывать переход в предаварийное состояние по ряду причин или по комбинации причин. Для достижения цели предложен вариант модели системы контроля за состоянием ТСО, функционирующий на коротких отрезках временного ряда при управлении процессом движения и на подготовительной стадии. Например, в задачах по разработке интегральной модульной авионики для того, чтобы реагировать на отказ, который может иметь катастрофические последствия, интервал обработки данных не должен превышать одной секунды (катастрофическая ситуация развивается как минимум в течение одной секунды [3]).

Инструментом реализации модели стала нечеткая когнитивная карта [4] (Fuzzy Cognitive Map, FCM), отвечающая цели исследования и системному подходу к решению задач. Элементы системы контроля представляют собой концепты (факторы) FCM, изображаемые как вершины ориентированного графа. Факторы характеризуются числовым уровнем и связаны между собой дугами ориентированного графа, веса которых отражают интенсивность причинной связи. Факторы, не зависящие от других (в рамках рассматриваемой системы контроля), относятся к состоянию внешней среды и прочим обстоятельствам, повлиять на которые в процессе работы ТСО невозможно.

Представляет интерес исследование функциональной устойчивости и работоспособности системы контроля, использующей математический аппарат FCM.

Базовая методология

Одним из подходов к построению модели сценариев развития отношений является построение нечеткой когнитивной карты [4], вариант которой представлен на рис. 1.

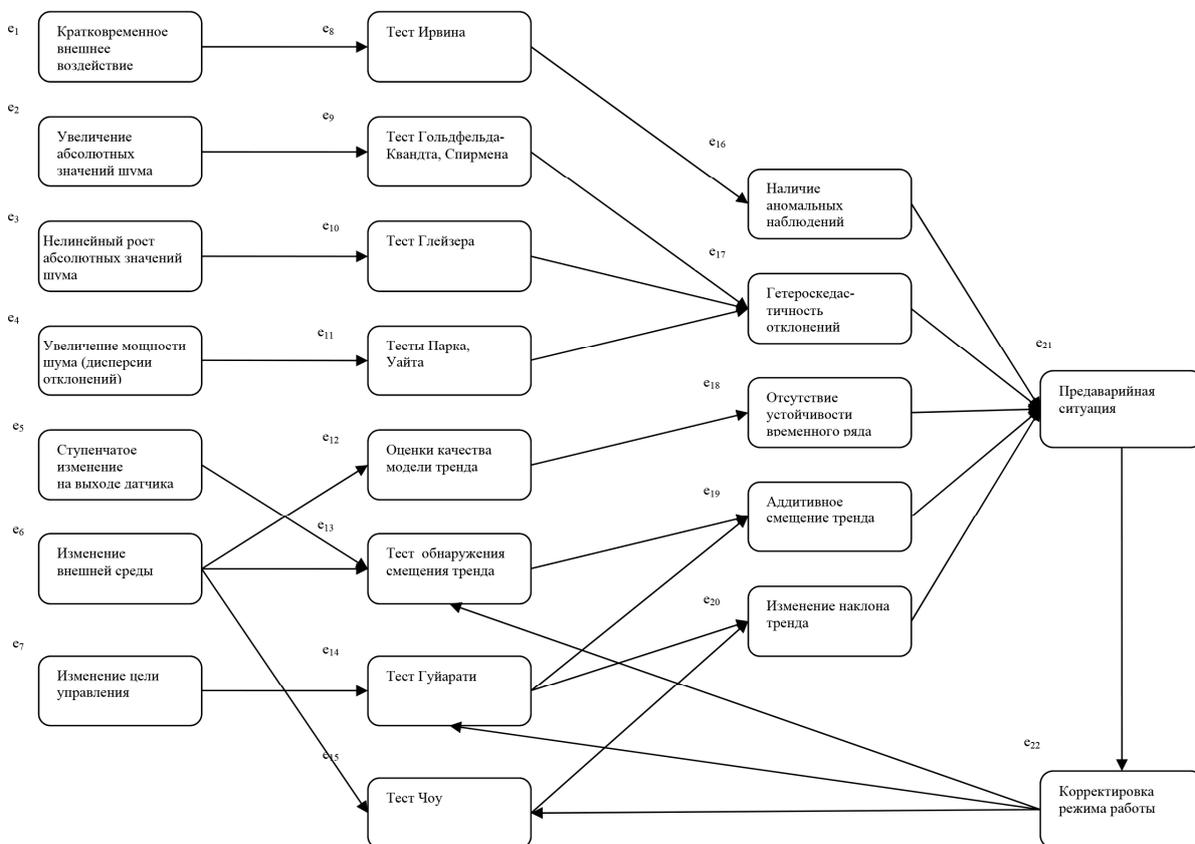


Рис. 1. Нечеткая когнитивная карта

Причинно-следственные связи в виде дуг ориентированного графа слева направо отражают логические цепочки: «изменение структуры выходного сигнала датчика» – «результат теста» – «вывод». Дуги графа, направленные справа налево, соответствуют «субъективной» части причинно-следственных связей, которые зависят от корректировки режима работы ТСО, т.е. когда влияние соответствующих факторов-причин может быть существенно уменьшено.

Включенные в модель факторы (концепты) характеризуются начальным уровнем, изменение которого возможно в процессе функционирования системы, а также отношениями с другими факторами с различной теснотой связи (интенсивностью). Кроме того, в модели присутствуют концепты экзогенного типа, не имеющие причин изменения в рамках моделируемой системы, но имеющие причины во внешней среде эксплуатации СТО. В изображенной схеме принято, что концепты $e_1 - e_4$ относятся, преимущественно, к объективно существующим внешним причинам, а $e_5 - e_7$ относятся к «субъективным» причинам, доступным для корректировки путем изменения режима работы СТО. Обратная связь в системе, изображенная между e_{22} и e_{13}, e_{14}, e_{15} , отображает возможность этой корректировки.

Моделирование произведено с помощью метода, реализованного Guillermo Ochoa de Aspuru в разработанном им Java-приложении [5]:

$$L_i^{(k)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{ij}^{(k-1)},$$

$$L_{ij}^{(k-1)} = E_{ij} (L_j^{(k-1)} - L_i^{(k-1)}) I_{ij} / 100,$$

$$i = \overline{1, n} \quad j = \overline{1, n},$$

где k – номер итерации; $L_i^{(k)}$ – уровень фактора i в диапазоне от 0 до 100; $L_{ij}^{(k-1)}$ – результат воздействия фактора j на фактор i ; E_{ij} – направление влияния, принимает значение -1 или 1 ; I_{ij} – интенсивность причинной связи, принимает значение в диапазоне от 0 до 100.

Технология проведения эксперимента и полученные результаты

Уровни факторов и интенсивности связей оцениваются в условных единицах от 0 до 100 и в ряде случаев выявляются в результате обработки мнений экспертов [6]. Значения интенсивности связей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность связей

Концепт – следствие	Концепт – причина	Интенсивность связи	Концепт – следствие	Концепт – причина	Интенсивность связи
1	2	3	4	5	6
e_1			e_{12}	e_6	50
e_2			e_{13}	e_5	50
				e_6	50
				e_{22}	50
e_3			e_{14}	e_7	50
				e_{22}	50
e_4			e_{15}	e_6	50
				e_{22}	50
e_5			e_{16}	e_8	50
e_6			e_{17}	e_9	50
				e_{10}	50
				e_{11}	50
e_7			e_{18}	e_{12}	50
e_8	e_1	50	e_{19}	e_{13}	50
				e_{14}	50
e_9	e_2	50	e_{20}	e_{14}	50
				e_{15}	50

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
e_{10}	e_3	50	e_{21}	e_{16}	75 100
				e_{17}	75 100
				e_{18}	75 100
				e_{19}	75 100
				e_{20}	75 100
e_{11}	e_4	50	e_{22}	e_{21}	75 100

Как следует из табл. 1, для концептов e_{21} и e_{22} в эксперименте рассматривалось несколько вариантов интенсивностей связей с концептами-причинами. Перечень факторов создан в основном диалоговом окне программы (рис. 2), а значения интенсивностей связей (эффектов) и начальные значения уровней факторов введены в окне редактора (рис. 3). Там изображен пример ввода положительной связи интенсивностью 50 между концептом-следствием e_{11} и концептом-причиной e_4 .

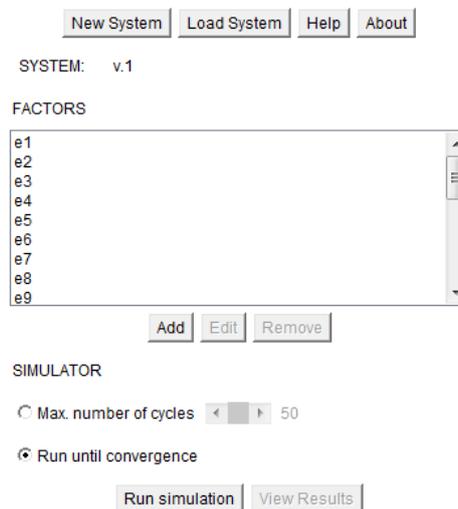


Рис. 2. Главное диалоговое окно

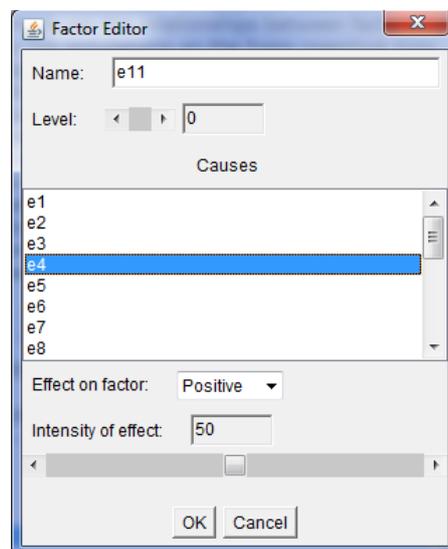


Рис. 3. Редактор свойств фактора

Скриншот окна вывода результатов испытаний представлен на рис. 4.

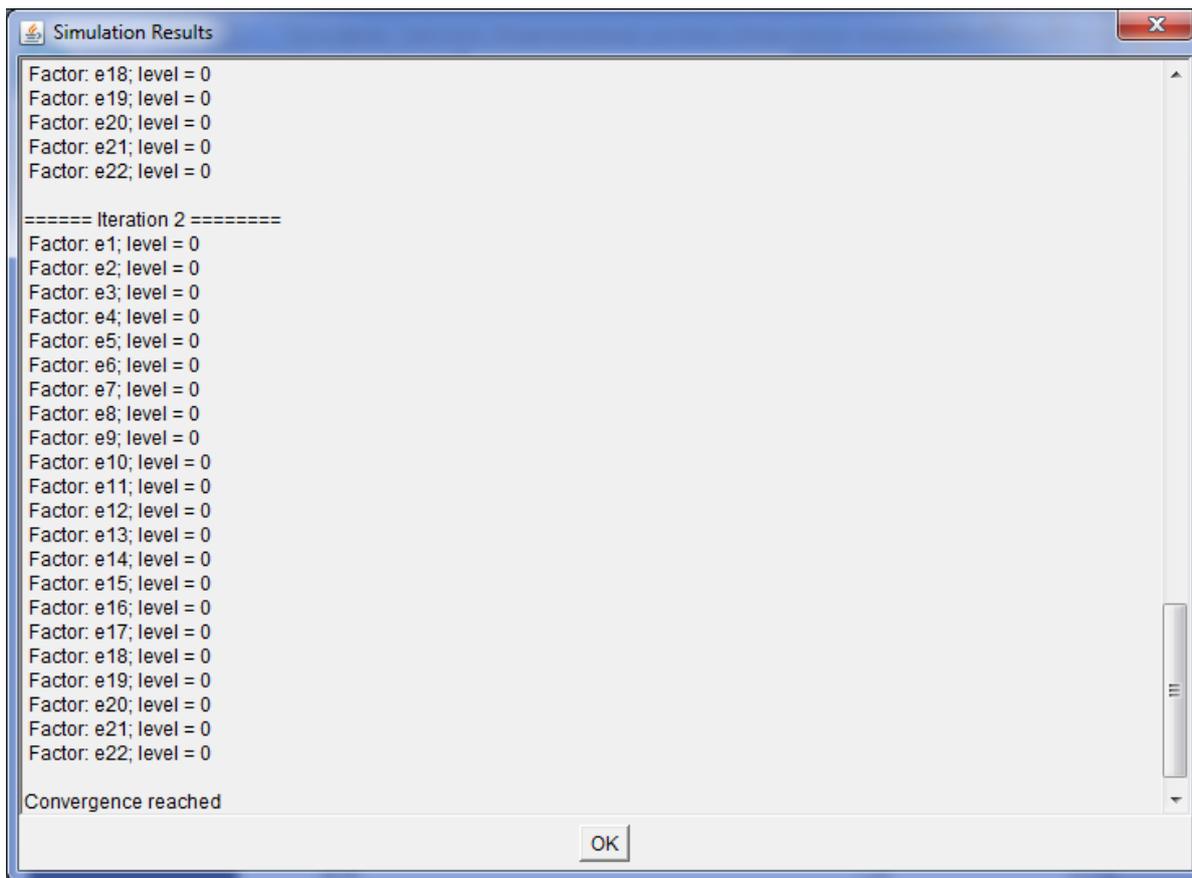


Рис. 4. Окно вывода результатов испытаний (симуляции)

Итерационный процесс, запускаемый для перехода карты в новое установившееся состояние, останавливался по признаку нулевой нормы поправки между векторами состояния факторов на соседних итерациях (Run until convergence).

Результаты исследований с помощью когнитивной карты получены в итоге итерационных процессов (Convergence reached), сходимость которых была достигнута во всех случаях.

Анализ результатов экспериментов

Итоговые состояния концептов представлены в табл. 2. Строки соответствуют номерам экспериментов, количество итераций обозначено как К.

Таблица 2

Примеры результирующих состояний концептов

Концепт	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8
e ₁	0	0	0	0	100	0	100
e ₂	0	0	0	0	100	0	100
e ₃	0	0	0	0	100	0	100
e ₄	0	50	50	100	100	0	100
e ₅	0	0	0	0	100	100	0
e ₆	0	0	0	0	100	100	0
e ₇	0	0	0	0	100	100	0
e ₈	0	0	0	0	100	0	100
e ₉	0	0	0	0	100	0	100
e ₁₀	0	0	0	0	100	0	100

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
e_{11}	0	50	50	100	100	0	100
e_{12}	0	0	0	0	100	100	0
e_{13}	0	0	0	0	100	100	0
e_{14}	0	0	0	0	100	100	0
e_{15}	0	0	0	0	100	100	0
e_{16}	0	0	0	0	100	0	100
e_{17}	0	16	16	33	100	0	100
e_{18}	0	0	0	0	100	100	0
e_{19}	0	0	0	0	100	100	0
e_{20}	0	0	0	0	100	100	0
e_{21}	0	3	3	6	100	60	40
e_{22}	0	3	3	6	100	60	40
К	2	8	8	8	12	12	11

Номера столбцов соответствуют номерам экспериментов, перечисленных ниже.

1. Нулевые состояния концептов означают работу элементов системы в нормативном состоянии и отсутствие вывода о предаварийной ситуации.

2. Увеличение мощности шума (дисперсии отклонений) представлено e_4 равным 50, и это выявлено с помощью тестов Парка и Уайта (e_{11}). Концепт предаварийной ситуации имеет состояние 3. Рекомендуется увеличение интенсивности причинно-следственных связей.

3. Интенсивность связи между e_{21} и концептами-причинами равна 75, между e_{22} и e_{21} равна 75 при прочих неизменных условиях. Состояние концепта предаварийной ситуации e_{21} не изменилось.

4. Увеличение мощности шума (дисперсии отклонений) представлено концептом e_4 , состояние его оценено как 100. Состояние концепта предаварийной ситуации e_{21} увеличилось до 6.

5. Все концепты-причины от e_1 до e_7 активны и имеют значение 100. Интенсивность связи между e_{21} и концептами-причинами равна 100, между e_{22} и e_{21} равна 100 при прочих неизменных условиях. Все остальные концепты достигают уровня 100.

6. Активны концепты-причины только от e_5 до e_7 и имеют значение 100. Причины предаварийной ситуации связаны с заданием на движение ТСО, доступны корректировке. Концепты-причины от e_1 до e_4 имеют значение 0. Состояние концепта предаварийной ситуации e_{21} увеличилось до 60.

7. Ситуация, обратная предыдущей. Активны концепты-причины только от e_1 до e_4 и имеют значение 100. Концепты-причины от e_5 до e_7 имеют значение 0. Состояние концепта предаварийной ситуации e_{21} изменилось и стало равным 40.

Заключение

Эксперименты 2–4 показывают важность настройки чувствительности системы контроля как с помощью уровней состояния концептов, так и с помощью интенсивностей причинно-следственных связей. Не является бесспорным и соотношение между уровнями концепта предаварийной ситуации e_{21} 60 и 40, соответствующими экспериментам 6 и 7. Несмотря на это, тестирование модели показывает ее адекватность в широком смысле, так как не обнаруживается противоречий между конечными установившимися состояниями системы и фундаментальными представлениями в предметной области. Достижение функциональной устойчивости и работоспособности системы контроля достигается только при комплексном подходе к оценке угрозы приближения к предаварийной ситуации. Используемый здесь инструментарий нечетких когнитивных карт достаточно плодотворен в отношении охвата смежных предметных областей [6, 7] и не связан с существенным ростом сложности алгоритма при усложнении параметрической датчиковой аппаратуры.

Библиографический список

1. Михеев, М. Ю. Математическое обеспечение автоматизированной информационной подсистемы проверки стабильности структуры временного ряда / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина, А. Е. Савочкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер.: Технические науки. Информационная технология. – 2014. – № 1 (3). – С. 193–203.

2. *Михеев, М. Ю.* Математические и информационно-структурные модели прогнозирования состояния технически сложных объектов / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин, М. А. Линкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 232–249.
3. *Авакян, А. А.* Мониторинг рабочего состояния отказоустойчивой платформы / А. А. Авакян, М. В. Копненко, А. К. Максимов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 67–79.
4. *Bart Kosko.* Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic / Bart Kosko. – New York : Hyperion, 1993. – 320 p.
5. Guillermo Ochoa de Aspuru. Fuzzy Cognitive Maps. – URL: <http://www.ochoadeaspuru.com/fuzcogmap/index.php>
6. *Михеев, М. Ю.* Методы анализа данных и их реализация в системах поддержки принятия решений : учеб. пособие / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – 118 с.
7. *Vasantha Kandasamy, W. B.* Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps / W. B. Vasantha Kandasamy, Florentin Smarandache. – Xiquan, Phoenix, 2003. – 212 p.

Прокофьев Олег Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: prokof_ow@mail.ru.

Савочкин Александр Евгеньевич

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: aebrat@mail.ru

Prokof'ev Oleg Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technologies
and systems,
Penza State Technological University
(440039, la/11 Baydukov direction / Gagarin street,
Penza, Russia)

Savochkin Aleksandr Evgen'evich

postgraduate student,
Penza State Technological University
(440039, la/11 Baydukov direction / Gagarin street,
Penza, Russia)

УДК 519.876.5

Прокофьев, О. В.

Моделирование системы обнаружения предаварийной ситуации на основе нечеткой когнитивной карты / О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 73–79. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-10.

Г. С. Садыхов

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ¹

G. S. Sadykhov

PLANNING RESOURCE TEST

Аннотация. Актуальность и цели. Работа посвящена планированию ресурсных испытаний однотипных объектов с целью определения минимального количества этих объектов и минимальной продолжительности этих испытаний в зависимости от оценки нижней доверительной границы усеченного среднего ресурса. **Материалы и методы.** Ряд ограничительных условий, например, связанных с проведением дополнительных испытаний сверх назначенных сроков использования, не позволяет воспользоваться существующими как параметрическими, так и непараметрическими методами расчета указанных величин. Поэтому в работе найдены принципиально новые решения, не требующие дополнительных испытаний сверх назначенного срока эксплуатации. Доказаны формулы расчета минимального объема выборки и минимальной продолжительности ресурсных испытаний. **Результаты.** Результаты работы используются при планировании ресурсных испытаний изделий радиоэлектроники новых видов. **Выводы.** Доказаны формулы расчета минимального количества объектов $N = n_0$ и минимальной продолжительности испытаний $T = t_0$ в зависимости от оценки нижней доверительной границы усеченного среднего ресурса при заданной доверительной вероятности.

Ключевые слова: ресурсные испытания, средний ресурс, продолжительность испытаний.

Abstract. *Background.* The work is devoted to the planning of resource tests of similar objects in order to determine the minimum number of these objects and the minimum duration of these tests, depending on the assessment of the lower confidence limit of the truncated mean resource. *Materials and methods.* A number of restrictive conditions, for example, connected with carrying out additional tests beyond the prescribed terms of use, do not allow using existing both parametric and nonparametric methods for calculating these values. Therefore, fundamentally new solutions have been found in the work that do not require additional tests beyond the prescribed lifetime. The formulas for calculating the minimum sample size and the minimum duration of resource tests are proved. *Results.* The results of the work are used in the planning of resource tests of radio electronics products of new types. *Conclusions.* The formulas for calculating the minimum number of objects and the minimum test duration are proved, depending on the estimation of the lower confidence limit of the truncated mean resource for a given confidence probability.

Key words: useful life tests, mean life, duration of tests.

Постановка задачи

При планировании ресурсных испытаний по планам вида $\{NUT\}$ необходимо определить минимальное количество однотипных объектов $N = n_0$ и минимальную продолжительность испытаний $T = t_0$. Для решения этой задачи используют параметрические [1–8] и непараметрические [9–17] методы. Если параметрические методы требуют информации о виде закона распределения наработок до первого отказа объекта, то непараметрические методы позволяют оценить показатели ресурса при отсутствии этих законов. Однако они используют информацию более общего характера, например, о принадлежности исследуемых объектов к классу объектов, у которых интенсивность отказов монотонно растет как функция времени. Чтобы определить, к какому классу принадлежат исследуемые объекты, необходимо провести дополнительные исследования и ресурсные испытания сверх времени t_0 . В связи с этим возникает задача, как обосновать минимальное количество однотипных

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 07-08-00574-а, № 10-08-00607-а).

объектов и минимальную длительность ресурсных испытаний для произвольного закона безотказных наработок без проведения дополнительных исследований и испытаний.

Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

1. Усеченный средний ресурс

Известно, что средний ресурс рассчитывается по формуле [18]

$$R = \int_0^{\infty} P(x) dx,$$

где $P(x)$ – вероятность безотказной работы объекта в течение времени x . Рассмотрим следующий показатель:

$$R_t = \int_0^t P(x) dx, \tag{1}$$

который назовем усеченным средним ресурсом, поскольку

$$R_t \leq R.$$

В работе [6] доказана следующая формула:

$$E(R_t^{(n)}) = K_n(\tau) R_t(\tau),$$

где $E(R_t^{(n)})$ – математическое ожидание величины, стоящей внутри скобок;

$$R_t(\tau) = \frac{1}{P(\tau)} \int_0^t P(\tau + x) dx;$$

$$K_n(\tau) = 1 - (1 - P(\tau))^n;$$

$$R_t^{(n)}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{n-k} \left(\sum_{i=1}^m z_i + (n-k-m)t \right), & \text{если } k \neq n; \\ 0, & \text{если } k = n; \end{cases}$$

здесь k – число отказавших объектов в течение времени τ из всех наблюдаемых в количестве n , z_i – наработка i -го отказавшего объекта на интервале времени $(\tau, \tau + t)$ из числа m всех отказавших объектов на этом интервале.

Полагая в этих формулах $\tau = 0$, получим

$$E(R_t^{(n)}) = R_t, \tag{2}$$

где показатель R_t определен формулой (1)

$$R_t^{(n)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^m z_i + (n-k)t \right) - \tag{3}$$

точечная оценка показателя R_t .

Другими словами, точечная оценка (3) показателя (1) несмещенная.

Этот вывод важен, поскольку число m и наработки z_i отказавших объектов внутри интервала наблюдения $(0, t)$ случайные величины, следовательно, точечная оценка (3) может иметь систематические (с избытком или недостатком) смещения относительно истинного значения показателя R_t .

Определим надежностный смысл показателя (1).

Введем следующую цензурированную сверху (справа) случайную величину $\zeta(t)$, которая равна безотказной наработке объекта, равной z , если отказ произошел на интервале наблюдения $(0, t)$, либо продолжительности наблюдения t , если отказа там не наблюдалось, т.е.

$$\zeta(t) = \begin{cases} z, & \text{если } z \in (0, t); \\ t & \text{– иначе.} \end{cases} \tag{4}$$

Функция распределения случайной величины (4) имеет следующий вид:

$$F_{\zeta}(x) = \begin{cases} F(x), & \text{если } x < t; \\ P(t) & \text{– иначе,} \end{cases} \tag{5}$$

где $F(x)$ – функция распределения безотказной наработки объекта. Видно, что функция (5) разрывна в точке $x = t$, при этом верхняя строка (4) соответствует непрерывной части смешанной случайной величины (4), а нижняя – дискретной части.

Поскольку

$$\int_0^t P(x) dx = tP(t) + \int_0^t xf(x) dx,$$

где $f(x) = -P'(x)$ – плотность распределения безотказной наработки, то согласно (1)

$$R_t = tP(t) + \int_0^t xf(x) dx. \tag{6}$$

Легко заметить, что правая часть (6) равна математическому ожиданию величины (4). Следовательно,

$$R_t = E(\zeta(t)). \tag{7}$$

Таким образом, надежностный смысл показателя (1) – это среднее значение безотказной наработки объекта в течение времени наблюдения t .

Из формулы (7) следует оценка

$$R_t \leq t,$$

причем оценка достижима тогда и только тогда, когда у объекта отсутствует отказ в течение времени наблюдения t .

Аналогичная оценка справедлива и для точечной оценки (3), а именно:

$$R_t^{(n)} \leq t. \tag{8}$$

Наконец, заметим, что формула (7) позволяет обосновать точечную оценку (3), полученную ранее с другой стороны, а именно: как среднее значение безотказных наработок n объектов в течение времени t .

2. Состоятельность точечной оценки (3)

Докажем, что оценка (3) состоятельна, т.е.

$$R_t^{(n)} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{\text{всп.}} R_t. \tag{9}$$

Другими словами, надо доказать, что для произвольного числа $\varepsilon > 0$ выполняется соотношение

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\left(\left|R_t^{(n)} - R_t\right| < \varepsilon\right) = 1, \tag{10}$$

где $\Pr\left(\left|R_t^{(n)} - R_t\right| < \varepsilon\right)$ – вероятность события, заключенного внутри скобок.

Было бы ошибочным на основании (9) сделать заключение, что с ростом n точечная оценка (3) стремится к R_t , т.е. из соотношения (9) не вытекает следующий предел:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_t^{(n)} = R_t.$$

Различие между указанными видами сходимости состоит в следующем: если $R_t^{(n)}$ стремится при $n \rightarrow \infty$ к R_t как пределу, в смысле обычного математического анализа, то начиная с некоторого $n > N$, выполняется неравенство

$$|R_t^{(n)} - R_t| < \varepsilon;$$

если же $R_t^{(n)}$ стремится по вероятности к R_t , то для отдельных значений n это неравенство может не выполняться, однако при $n \rightarrow \infty$ вероятность события

$$|R_t^{(n)} - R_t| \geq \varepsilon$$

стремится к нулю.

Таким образом, соотношение (9) утверждает, что при $n \rightarrow \infty$ точечная оценка (3) стремится по вероятности к R_t и, следовательно, обладает свойством устойчивости при больших n .

Для доказательства (10) найдем верхнюю оценку дисперсии, смешанной (непрерывной и дискретной) случайной величины (3). В связи с этим воспользуемся следующим соотношением для дисперсии [6]:

$$D(R_t^{(n)}) = \frac{1}{n} \left\{ \left[\int_0^t u^2 f(u) du - \left(\int_0^t u f(u) du \right)^2 \right] + t^2 F(t) P(t) - 2tP(t) \int_0^t u f(u) du \right\}. \quad (11)$$

Поскольку для безотказной наработки z внутри интервала $(0, t)$ имеем

$$E(z) = \frac{1}{F(t)} \int_0^t u f(u) du, \quad E(z^2) = \frac{1}{F(t)} \int_0^t u^2 f(u) du,$$

то согласно (11) получим

$$D(R_t^{(n)}) = \frac{F(t)}{n} [E(z^2) - F(t)E^2(z) + t^2P(t) - 2tP(t)E(z)].$$

Далее, преобразуя правую часть, найдем

$$D(R_t^{(n)}) = \frac{F(t)}{n} [D(z) + P(t)(t - E(z))^2]. \quad (12)$$

Согласно свойству дисперсии имеем

$$D(z) \leq E\left(z - \frac{t}{2}\right)^2.$$

Учитывая оценку

$$z - \frac{t}{2} < \frac{t}{2},$$

получим

$$D(z) < \frac{t^2}{4}.$$

Используя полученную оценку в (12), найдем

$$D(R_i^{(n)}) < \frac{F(t)}{n} \left[\frac{t^2}{4} + P(t)(t - E(z))^2 \right].$$

Так как

$$t - E(z) < t,$$

то

$$D(R_i^{(n)}) < \frac{5t^2}{4n}. \tag{13}$$

Далее воспользуемся неравенством Чебышева [19] для случайной величины $R_i^{(n)}$:

$$\Pr\left(\left|R_i^{(n)} - E(R_i^{(n)})\right| \geq \varepsilon\right) \leq \frac{D(R_i^{(n)})}{\varepsilon^2},$$

где $\varepsilon > 0$ – произвольное число.

Учитывая (2) и оценку (13), имеем

$$\Pr\left(\left|R_i^{(n)} - R_i\right| \geq \varepsilon\right) < \frac{5t^2}{4n\varepsilon^2}.$$

Перейдя к пределу при $n \rightarrow \infty$, получим

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\left(\left|R_i^{(n)} - R_i\right| \geq \varepsilon\right) = 0,$$

откуда следует (10), что доказывает (9) и тем самым – состоятельность оценки (3).

3. Нижняя доверительная граница усеченного среднего ресурса

При малых объемах наблюдения за однотипными объектами степень доверия к точечной оценке (3) показателя R_i , как выяснилось выше, крайне низка. Поэтому установим нижнюю доверительную границу показателя (1) при заданной доверительной вероятности, свободную от этого недостатка.

Для этой цели воспользуемся неравенством Сельбера [20] для случайной величины X

$$\Pr(X \leq E(X) + \beta) \geq \frac{\beta^2}{\beta^2 + D(X)}, \tag{14}$$

где $\beta > 0$ – произвольное число.

Полагая в (14) $X = R_i^{(n)}$, с учетом формулы (2), получим

$$\Pr(R_i \geq R_i^{(n)} - \beta) \geq \frac{\beta^2}{\beta^2 + D(R_i^{(n)})}.$$

Используя оценку (13), находим

$$\Pr(R_i \geq R_i^{(n)} - \beta) > \frac{4n\beta^2}{4n\beta^2 + 5t^2}.$$

Приравняв правую часть наперед заданному значению доверительной вероятности p , получим

$$\beta = \frac{t}{2} \sqrt{\frac{5p}{n(1-p)}}.$$

Следовательно,

$$\Pr(R_t \geq \underline{R}_t^{(n)}) > p,$$

где

$$\underline{R}_t^{(n)} = R_t - \frac{t}{2} \sqrt{\frac{5p}{n(1-p)}} \quad (15)$$

нижняя доверительная граница усеченного среднего ресурса.

Видно, что при $p \rightarrow 0$, имеем

$$\underline{R}_t^{(n)} \rightarrow R_t^{(n)}.$$

Другими словами, точечная оценка показателя (1) является пределом нижней доверительной границы при стремлении доверительной вероятности к нулю. Поэтому доверие к точечной оценке (3) крайне низко. Однако это доверие повышается при $n \rightarrow \infty$.

4. Планирование необходимого количества объектов для проведения ресурсных испытаний

Формула (15) доказана в предположении, что задано количество однотипных объектов n , наблюдаемых в течение времени t . Пусть теперь, напротив, задана следующая оценка нижней доверительной границы показателя (1):

$$\underline{R}_t^{(n)} \geq r, \quad (16)$$

где $r < t$ и надо найти минимальное количество однотипных объектов n_0 планируемых для проведения ресурсных испытаний в течение времени t .

Докажем, что такое количество объектов определяется по формуле

$$n_0 = \min \left\{ n \mid n \geq \frac{5p}{4(1-p)} \left(\frac{t}{t-r} \right)^2 \right\}. \quad (17)$$

Для доказательства воспользуемся формулой (15), из которой найдем

$$n = \frac{5p}{4(1-p)} \left(\frac{t}{R_t^{(n)} - \underline{R}_t^{(n)}} \right)^2.$$

Используя оценки (8) и (16), получим

$$n \geq \frac{5p}{4(1-p)} \left(\frac{t}{t-r} \right)^2.$$

Отсюда найдем искомую формулу (17).

Заметим, что установленная формула (17) справедлива для любого закона распределения безотказных наработок объекта.

Из формулы (17) следует, что при небольших уровнях доверительной вероятности p количество объектов, планируемых для проведения ресурсных испытаний, сокращается и, напротив, возрастает для значений вероятности p , близких к единице.

Аналогичный вывод (из формулы (17)) можно сделать и о количестве планируемых объектов для проведения ресурсных испытаний в зависимости от принимаемых значений r , ($0 < r < t$), а именно: минимальное количество объектов для проведения ресурсных испытаний мало при малых значениях r и, напротив, возрастает при r близких к значению t .

Наконец, отметим, что минимальное количество планируемых объектов согласно формуле (17) сокращается с увеличением длительности проведения испытаний t и, напротив, увеличивается при уменьшении длительности испытаний.

Все выводы, сделанные из формулы (17), хорошо согласуются с логикой проведения ресурсных испытаний.

Пример. Найти минимальное количество однотипных объектов для проведения ресурсных испытаний в течение 6000 ч при условии, что нижняя доверительная граница усеченного среднего ресурса при доверительной вероятности, равной 0,8, не менее 1000 ч.

Решение. Согласно условиям примера имеем $t = 6000$ ч; $p = 0,8$; $r = 1000$ ч.

Тогда

$$\frac{5p}{4(1-p)} \left(\frac{t}{t-r} \right)^2 = \frac{5 \cdot 0,8}{4 \cdot 0,2} \left(\frac{6000}{6000-1000} \right)^2 = 7,2.$$

Следовательно, минимальное количество однотипных объектов, необходимых для проведения ресурсных испытаний в течение времени 6000 ч, согласно формуле (17) равно 8.

5. Планирование минимальной продолжительности времени проведения ресурсных испытаний

При организации ресурсных испытаний важную роль играет планирование минимальной продолжительности времени испытаний.

В связи с этим установим следующую формулу для планирования минимальной продолжительности времени при проведении ресурсных испытаний:

$$t_0 = \frac{r}{1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5p}{n(1-p)}}}, \quad (18)$$

где n – количество испытываемых однотипных объектов, удовлетворяющих условию

$$n > \frac{5p}{4(1-p)}; \quad (19)$$

p – доверительная вероятность нижней доверительной границы показателя (1); r – заданное значение ($0 < r < t$) в оценке (16).

Для доказательства (18) воспользуемся формулой (15), из которой получим

$$R_t^{(n)} - \underline{R}_t^{(n)} = \frac{t}{2} \sqrt{\frac{5p}{n(1-p)}}.$$

Используя оценки (8) и (16), имеем

$$t - r \geq \frac{t}{2} \sqrt{\frac{5p}{n(1-p)}}.$$

Следовательно,

$$t \left(1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5p}{n(1-p)}} \right) \geq r.$$

Так как при условии (19) второй сомножитель положителен, то

$$t > \frac{r}{1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5p}{n(1-p)}}},$$

что доказывает формулу (18).

Доказанная формула пригодна для любого закона распределения безотказных наработок объекта.

Нетрудно убедиться в том, что с увеличением значений доверительной вероятности p согласно формуле (18) увеличивается длительность планируемых ресурсных испытаний и, напротив, длительность ресурсных испытаний уменьшается с уменьшением значений p .

Кроме того, из формулы (18) видно, что минимальная продолжительность планируемых ресурсных испытаний увеличивается с уменьшением количества однотипных объектов n и, напротив, продолжительность ресурсных испытаний уменьшается с увеличением значений n .

Пример. Найти минимальную продолжительность проведения ресурсных испытаний девяти однотипных объектов при условии, что нижняя доверительная граница усеченного среднего ресурса при доверительной вероятности, равной 0,8, не менее 1500 ч.

Решение. Согласно условиям примера имеем $n = 9$; $p = 0,8$; $r = 1500$ ч.

Так как

$$9 > \frac{5 \cdot 0,8}{4(1-0,8)} = 5,$$

то выполняется условие (19).

Следовательно, по формуле (18) находим минимальную продолжительность проведения ресурсных испытаний, равной

$$t_0 = \frac{1500}{1 - \frac{1}{2} \sqrt{5 \cdot 0,8}} = 5769,2 \text{ ч.}$$

Заключение

Таким образом, для проведения ресурсных испытаний однотипных объектов по плану $\{NUT\}$, законы распределения безотказных наработок которых до первого отказа произвольны, доказаны формулы расчета минимального количества объектов $N = n_0$ и минимальной продолжительности испытаний $T = t_0$ в зависимости от оценки нижней доверительной границы усеченного среднего ресурса при заданной доверительной вероятности.

Библиографический список

1. *Судаков, Р. С.* Испытания систем: выбор объемов и продолжительности / Р. С. Судаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 455 с.
2. *Переверзев, Е. С.* Надежность и испытания технических систем / Е. С. Переверзев. – Киев : Наукова думка, 2009. – 328 с.
3. *Герасимов, О. Н.* Способ организации производственного контроля и диагностики РЭС с заданным уравнением остаточного ресурса / О. Н. Герасимов, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 94–98.
4. *Гласко, А. В.* Определение минимального объема выборки респондентов для проведения социологического исследования / А. В. Гласко, Л. Г. Садыхова // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 7. – С. 116–124.
5. *Садыхов, Г. С.* Зависимость показателей ресурса от характеристик его расходования / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко // Доклады РАН. – 1998. – Т. 361, № 2. – С. 189–191.
6. *Садыхов, Г. С.* Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, Н. И. Сидняев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 382 с.
7. *Баранов, Н. А.* Методы анализа функциональной безопасности сложных технических систем / Н. А. Баранов, Л. И. Турчак. – М. : ВЦ РАН, 2006. – 186 с.
8. *Sadykhov, G. S.* Technical Condition Control Calculation for Hazardous Industrial Facilities / G. S. Sadykhov // Journal of Machinery Manufactures and Reliability. – 2014. – Vol. 43. – P. 327–332.
9. *Димитриенко, Ю. И.* Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления / Ю. И. Димитриенко, Ю. В. Юрин, С. В. Европин // Известия вузов. Машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 3–11.
10. *Gamiz, M. Z.* Non-parametric Estimation of the Availability in a General Repairable System / M. Z. Gamiz, Y. G. Roman // Reliability Engineering and System Safety. – 2008. – Vol. 93, iss. 8. – P. 1188–1196.
11. *Sadykhov, G. S.* Computation of the Least Number of Objects Necessary for the Cyclical Reliability Testing / G. S. Sadykhov, I. A. Babaev // Journal of Machinery Manufactures and Reliability. – 2016. – Vol. 45, № 3. – P. 239–246.
12. *Беляев, Ю. К.* Непараметрические методы в задачах обработки результатов испытаний и эксплуатации / Ю. К. Беляев. – М. : Знание, 1984. – 65 с.

13. Садыхов, Г. С. Непараметрические и предельные оценки длительности безопасного срока эксплуатации техногенно-опасных объектов / Г. С. Садыхов, О. В. Некрасова // Труды Ин-та системного анализа РАН. – М., 2010. – Т. 53, вып. 14. – С. 191–198.
14. Садыхов, Г. С. Средняя наработка до критического отказа техногенно-опасного объекта: предельные и непараметрические оценки / Г. С. Садыхов, О. В. Елисеева, И. А. Бабаев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 3. – С. 37–46.
15. Sadykhov, G. S. Average Number of Failure-Free Operations up to Critical Failure of Technologically Dangerous Facility: Calculation, Limit and Non-parametric Estimates / G. S. Sadykhov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2013. – Vol. 43, № 1. – P. 81–88.
16. Садыхов, Г. С. Средняя доля остаточного ресурса и ее непараметрические оценки / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. Вычислительный центр РАН. – 2005. – Вып. 1. – С. 65–72.
17. Sadykhov, G. S. Non-parametric Assessment and Limiting Probability Values of the Hazardous and Safe States of a Technogenic-Hazardous Object / G. S. Sadykhov, I. A. Babaev // Journal of Machinery Manufactures and Reliability. – 2015. – Vol. 44, № 3. – P. 298–304.
18. ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 32 с.
19. Гнеденко, Б. В. Математические методы теории надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : URSS, 2013. – 584 с.
20. Selberg, H. L. On an Inequality in Mathematical Statistics / H. L. Selberg // Norsk. Mat. Tidsskr. – 2005. – № 24. – P. 1–12.

Садыхов Гулам Садыхович

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

Sadykhov Goulam Sadykhovich

doctor of technical sciences, professor,
chief research scientist,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, 5/1, 2-ya Baumanskaya st., Moscow, Russia)

УДК 62.192**Садыхов, Г. С.**

Планирование ресурсных испытаний / Г. С. Садыхов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 80–88. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-11

В. М. Строев, И. Н. Комбарова

ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВЫЙ СПЕЦПРОЦЕССОР НА ОСНОВЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КМОП-МАТРИЦ

V. M. StroeV, I. N. Kombarova

DISCRETE ANALOG SPECIAL PROCESSOR ON THE BASIS OF PHOTSENSITIVE CMOS-MATRIXES

Аннотация. Основное преимущество дискретно-аналоговых спецпроцессоров (ДАС) на фоточувствительных приборах с зарядовой связью заключается в осуществлении пространственно-временной обработки одновременно с формированием изображения. Применение ДАС позволяет производить выделение неподвижных и движущихся малоконтрастных объектов на нестационарном фоне. Недостатком известных способов реализации ДАС является низкое быстродействие пространственно-временной обработки обусловленное тем, что обработка осуществляется последовательно и число дискретных накоплений всегда максимально независимо от условий наблюдения. Цель работы расширить функциональный диапазон ДАС и уменьшить время обработки. Достижение данной цели предполагается за счет использования фоточувствительных КМОП-матриц, основное преимущество которых заключается в наличии режима неразрушающего считывания. Предложена реализация дискретно-аналогового спецпроцессора (ДАС) на основе фоточувствительных КМОП-матриц, произведено сравнение с существующими реализациями ДАС на ФПЗС, уточнены условия реализации, исключая фазовые искажения, получено выражение для частотной характеристики. В статье показано, что исключение фазовых искажений позволит повысить частоту кадров ДАС на основе высокоскоростных телекамер более, чем в 8 раз. Также применение фоточувствительных КМОП-матриц позволило реализовать обработку с применением нерекурсивной и рекурсивной фильтрации, адаптивную к условиям наблюдения.

Ключевые слова: дискретно-аналоговые спецпроцессоры, ФПЗС, КМОП-матрицы, режим дискретного накопления со сдвигом.

Abstract. The main advantage of discrete-analog special processors (DAS) on FPZS is the implementation of spatiotemporal processing simultaneously with the formation of the image. The use of DAS makes it possible to select stationary and moving low-contrast objects on a non-stationary background. The disadvantage of the known methods for implementing DAS is the low speed of spatiotemporal processing due to the fact that the processing is carried out sequentially and the number of discrete accumulations is always the maximum regardless of the observation conditions. The aim of this work is to extend the functionality of the DAS and reduce the processing time. This aim is expected to be achieved through the use of photosensitive CMOS-matrixes. Their main advantage is the nondestructive reading mode. A realization of the discrete analog special processor (DAS) based on photosensitive CMOS-matrixes was proposed; comparison with existing implementations of DAS on the FPZS was made; the conditions of sale, eliminating the phase distortion, were clarified; an expression for the frequency response was obtained. The article shows that the elimination of phase distortions increases the frame rate of DAS based on high-speed cameras for more than 8 times. Also, the use of photosensitive CMOS-matrixes has allowed the implementation the processing with the use of non-recursive and recursive filtering, adaptive to the observation conditions.

Key words: discrete analog special purpose processors, CCD, CMOS matrix, the discrete mode of accumulation with a shift.

Аналізу вопросов построения дискретно-аналоговых спецпроцессоров (ДАС) на фоточувствительных приборах с зарядовой связью (ФПЗС) посвящено большое количество работ, основные результаты которых представлены и обобщены в работах [1–3].

Для широкого класса ДАС характерно применение режима дискретного накопления со сдвигом и его модификаций [3, 4]. Он основан на том, что пространственно-временную обработку выполняют путем дискретного накопления зарядов, фотогенерированных под воздействием проециру-

емого изображения в потенциальных ямах ФПЗС, и перемещают в пространстве изображение относительно матрицы ФПЗС. Время накопления в каждой точке пространства изменяют пропорционально величине отсчетов импульсной характеристики реализуемого пространственно-временного фильтра в зависимости от вида фильтрации, в цикле накопления осуществляется пауза на время, необходимое для обеспечения постоянства временного интервала между циклами накопления.

Такого типа ДАС ориентированы на реализацию нерекурсивных фильтров. Режим дискретного накопления реализует операцию умножения каждой точки изображения на отсчеты импульсной характеристики, задаваемые временем накопления. Взаимный сдвиг сцены наблюдения и матрицы ФПЗС реализует задержку по пространству. Время накопления плюс регулируемая временная пауза задают период дискретизации по времени. Сочетание данных операций позволяет реализовать дискретные нерекурсивные фильтры с различными характеристиками. Определение значений отсчетов импульсной характеристики выполняют на основе хорошо разработанных методов синтеза дискретных фильтров.

Недостатком известных способов реализации ДАС является низкое быстродействие пространственно-временной обработки, обусловленное тем, что обработка осуществляется последовательно и число дискретных накоплений всегда максимально независимо от условий наблюдения.

Цель работы расширить функциональный диапазон ДАС и уменьшить время обработки. Достижение данной цели предполагается за счет использования фоточувствительных КМОП-матриц, основное преимущество которых заключается в наличии режима неразрушающего считывания.

Способ пространственно-временной обработки изображений на основе фоточувствительных КМОП-матриц отличается тем, что в определенные моменты времени в течение паузы производится неразрушающее считывание сформированного изображения для определения достаточного количества циклов «накопление – пространственный сдвиг – пауза», также измеряется освещенность проецируемого изображения и в зависимости от величины освещенности формируется сигнал, который управляет длительностью стадий дискретного накопления зарядов.

Докажем возможность построения ДАС на основе КМОП-матриц.

Режим дискретного накопления. В КМОП-матрице или ФПЗС фотоны света, прошедшие через объектив и попавшие на светочувствительную область фотодиода, благодаря внутреннему фотоэффекту генерируют электроны, которые скапливаются в потенциальной яме каждого фотодиода. Чем интенсивнее световой поток и больше время его накопления (экспозиция), тем больший заряд скапливается [5]. Так же, как ФПЗС, КМОП-матрица состоит из фотодиодов, но роль «хранителя» заряда выполняет конденсатор. Рядом с фотодиодом располагаются транзисторы. Первый в качестве электронного ключа, открывающего цепь «фотодиод – конденсатор», второй – для установки конденсатора в «начальное» состояние. Как правило, «начальным» состоянием у конденсатора КМОП-матрицы будет заряженное состояние, а фотодиод будет разряжать его. Сначала конденсатор заряжается до определенного значения. Затем транзистор цепи заряда закрывается, и конденсатор начинает разряжаться через цепь фотодиода. Чем больше света попадает на фотодиод, тем больше он разряжает конденсатор. Затем измеряется оставшееся напряжение, и по полученному значению падения напряжения определяется количество света, попавшего на определенную ячейку. Время между прекращением заряда конденсатора и измерением напряжения на нем будет временем экспозиции [5]. Таким образом, для режима дискретного накопления не существует разницы, что использовать КМОП-матрицу или ФПЗС.

Хранение накопленных зарядовых пакетов до начала следующего этапа дискретного накопления организуют путем экранирования фоточувствительной поверхности КМОП-матрицы на время хранения с помощью обтюратора на основе электрооптических эффектов Керра, Поккельса, позволяющих переключать световой поток с частотой до 10^{13} Гц [6].

Взаимное перемещение КМОП-матрицы и оптического изображения реализуется путем применения электрооптического эффекта Керра: непрерывное отклонение луча, имеющее высокую точность перемещения, можно получить, используя призму из электрооптического материала с нанесенными на ее торцовых гранях металлическими электродами, к которым прикладывается управляющее напряжение [6].

Неразрушающее считывание заряда. Режим работы матрицы, при котором сигнал с пикселей снимается, а заряд в них продолжает копиться, может быть полезен при необходимости проведения траекторных измерений. В кадре строится траектория объекта, а по кадрам, считанным без разрушения заряда пикселей, определяется текущая скорость объекта [7]. Кроме проведения траекторных измерений, неразрушающее считывание используется для измерения освещенности проецируемого

изображения и в зависимости от величины освещенности формируется сигнал, который управляет длительностью стадий дискретного накопления зарядов с целью исключения случаев полного разряда накапливающих конденсаторов до момента окончания обработки.

При реализации способа можно использовать две КМОП-матрицы, выходы которых подключены к входам вычитающего устройства, что позволяет реализовать обработку, в которой используются отрицательные отсчеты импульсной характеристики.

Уточним условия реализации ДАС, производящего обработку изображения за I этапов, состоящих из K циклов ($s = iK + k$) при выполнении следующих требований:

- длительность каждого цикла должна быть постоянной;
- каждый цикл должен включать стадию накопления длительностью $T_{i,k}$ и стадию хранения

длительностью $TX_{i,k} = \Delta - T_{i,k}$, во время которой осуществляется сдвиг по пространству;

- длительность стадии накопления $T_{i,k}$ пропорциональна величине соответствующего отсчета импульсной характеристики.

Можно показать, что полное выражение для частотной характеристики ДАС, реализованной на двух ФПЗС, объединенных вычитающим устройством, будет иметь вид

$$H(\phi_x, \phi_y, \phi_t) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_{i,k} e^{-j \left[\phi_x \frac{X(i,k)}{\Delta_x} + \phi_y \frac{Y(i,k)}{\Delta_y} + \phi_t (Ki+k+b_{i,k}) \right]}, \quad (1)$$

где ϕ_x, ϕ_y, ϕ_t – нормированные пространственные и временная частоты; $\alpha_{i,k}$ – коэффициенты, определяемые отсчетами импульсной характеристики, равные

$$\alpha_{i,k} = \frac{A1}{T_{\max}} (T_{i,k}^+ - T_{i,k}^-), \quad (2)$$

$X(i,k), Y(i,k)$ – функции, описывающие сдвиг изображения по координатам, необходимый для осуществления пространственной обработки; Δ_x, Δ_y – пространственный интервал между ячейками

ФПЗС соответственно по осям x и y ; $b_{i,k} = \frac{T_{i,k}}{2\Delta} = \frac{T_{\max} |\alpha_{i,k}|}{2\Delta} = b_{\max} |\alpha_{i,k}|$ – дополнительный фазовый коэффициент; i, k – целочисленные переменные; $A1$ – постоянный коэффициент; $T_{i,k}^+$ – длительность стадии накопления в первом ФПЗС, соответствующая положительному отсчету импульсной характеристики; $T_{i,k}^-$ – длительность стадии накопления во втором ФПЗС, соответствующая отрицательному отсчету импульсной характеристики; $b_{\max} = \frac{T_{\max}}{2\Delta}$ – максимальное значение коэффициента $b_{i,k}$.

Из уравнения (1) следует, что наличие фазового коэффициента, определяемого значением $b_{i,k}$, будет приводить к искажениям частотной характеристики ДАС, что в свою очередь будет вызывать искажения изображения, формируемого в процессе обработки.

Для уменьшения вносимых искажений необходимо уменьшать максимальное значение коэффициента $b_{i,k}$. Однако уменьшение b_{\max} при постоянном T_{\max} возможно лишь путем увеличения длительности цикла и, как следствие, уменьшения частоты кадров ДАС. Покажем это для простейшего случая, когда ДАС с коэффициентами $\alpha_{i,k} = \sin(\phi_{i_0} k)$ производит узкополосную временную фильтрацию на центральных частотах $\pm \phi_{i_0}$ за один этап ($I = 1$) из K циклов.

Для этого случая посредством моделирования был получен ряд изображений, формируемых при различных значениях b_{\max} из исходного ($b_{\max} = 0$) путем применения фильтра с частотной характеристикой следующего вида:

$$H(\phi_{i_0}) = \sum_{k=0}^{K-1} \sin(\phi_{i_0} k) e^{-j \left[\phi_{i_0} (k+b_{\max} |\sin(\phi_{i_0} k)|) \right]}. \quad (3)$$

Результаты моделирования показали, что искажения изображения, формируемого ДАС, из-за влияния дополнительного фазового коэффициента малы, если $b_{\max} \leq 0,1$. Определим граничную частоту кадров ДАС, реализующего трехмерный нерекурсивный пространственно-временной фильтр 11-го порядка при b_{\max} не более 0,1. При таких условиях, с одной стороны, $T_{\max} = MT_{\min}$, где M – число уровней квантования сигнала изображения, T_{\min} – минимальное время накопления, а с другой – длительность цикла должна быть не менее $\Delta = \frac{1}{FK \cdot I \cdot K}$, где FK – частота кадров. Отсюда следует, что справедливо соотношение $b_{\max} = \frac{T_{\max}}{2\Delta} = \frac{MT_{\min} FK \cdot I \cdot K}{2} \leq 0,1$.

Это соотношение для телекамеры с $T_{\min} = 10$ нс при числе уровней квантования сигнала изображения не менее 64 трансформируется в следующее ограничение $FK \leq 235$ Гц, т.е. уменьшение b_{\max} с целью снижения искажений частотной характеристики ДАС одновременно вызывает уменьшение частоты кадров обрабатываемых ДАС изображений.

Чтобы устранить это противоречие, необходимо исключить коэффициент $b_{i,k}$ из выражения для частотной характеристики ДАС, что позволит одновременно устранить искажения частотной характеристики и увеличить коэффициент b_{\max} до его предельного значения 0,9, что в свою очередь позволит построить ДАС на основе высокоскоростных телекамер с частотой кадров до 2000 Гц.

Можно показать, что данная задача решается, если обеспечить постоянство не длительности цикла, а временного интервала между центрами соседних стадий накопления, как показано на рис. 1.

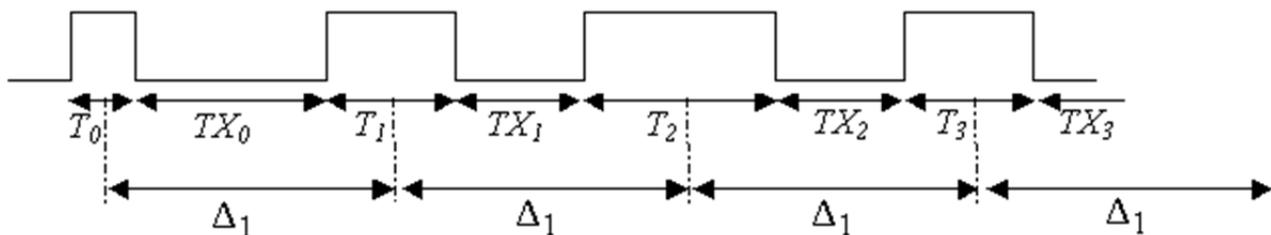


Рис. 1. Временные диаграммы цикла работы ДАС

При этом временные параметры ДАС в модифицированном режиме дискретного накопления со сдвигом должны быть следующими:

- интервал Δ_1 между центрами соседних стадий накопления должен быть постоянным;
- каждый цикл должен состоять из стадии накопления длительностью $T_{i,k}$ и стадии хранения

длительностью $TX_{i,k} = \Delta_1 - \frac{T_{i,k+1}}{2} - \frac{T_{i,k}}{2}$, во время которой осуществляется сдвиг по пространству.

При этом длительность последней стадии хранения в цикле должна быть равна $TX_{i,k-1} = \Delta_1 - \frac{T_{i+1,0}}{2} - \frac{T_{i,k-1}}{2}$. Если принять, что время накопления в $(k+1)$ и k -м циклах равно максимальному значению T_{\max} , то значение Δ_1 должно быть $\geq T_{\max}$;

- длительность стадии накопления $T_{i,k}$ пропорциональна величине соответствующего отсчета импульсной характеристики;
- временной интервал между центрами стадий накопления соответствующих циклов для соседних этапов должен быть равен $K\Delta_1$, т.е. длительность этапа равна $T = K\Delta_1$;
- длительность этапа может быть искусственно увеличена путем введения циклов без стадии накопления.

То обстоятельство, что длительность T этапа и временной интервал Δ_1 между центрами стадий накопления жестко связаны между собой, ограничивает возможности ДАС. Для развязки этих

величин необходимо после последней стадии хранения в цикле каждого этапа ввести паузу длительностью $TP_i = T - K\Delta_i$. При этом длительность последней стадии хранения в цикле рассчитывается так же, как и в случае без паузы между этапами.

С учетом вышеуказанных условий частотная характеристика (1) ДАС в модифицированном режиме дискретного накопления со сдвигом приводится к виду

$$H(\phi_x, \phi_y, \phi_t) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_{i,k} e^{-j\left[\phi_x \frac{X(i,k)}{\Delta_x} + \phi_y \frac{Y(i,k)}{\Delta_y} + \phi_t \left(\frac{T}{\Delta_i} i+k\right)\right]}, \quad (4)$$

в котором отсутствует дополнительный фазовый коэффициент, определяемый значением $b_{i,k}$.

Полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

- при существующих требованиях к временным параметрам ДАС (постоянство длительности цикла) его реализация возможна на основе телекамер с частотой кадров не более 235 Гц;
- обеспечение постоянства временного интервала между центрами стадий накоплений позволит построить ДАС на основе высокоскоростных телекамер с частотой кадров до 2000 Гц.

Оценим преимущества, получаемые за счет использования неразрушающего считывания. В ДАС без неразрушающего считывания для достижения необходимого результата значения I и K должны быть максимальны из-за ориентации на самые сложные условия наблюдения.

В предлагаемом способе можно сначала осуществить только четыре накопления со сдвигами при $i = 0 \dots 1$ и $k = 0 \dots 1$, после этого вывести обработанное изображение и оценить полученный результат с использованием специальных программ. Если результат устраивает, то закончить обработку. Если нет, то произвести дополнительные накопления со сдвигами так, чтобы образовался набор накоплений со сдвигами при $i = 0 \dots 2$ и $k = 0 \dots 2$. Снова производятся считывание изображения и оценка результата, и так до получения необходимого результата. Таким образом, в предлагаемом способе обработка может закончиться быстрее, чем в прототипе.

Для примера возьмем простейший случай – подавление высокочастотных шумов в изображении неподвижной сцены, при этом шум за время обработки неизменен, также выполняются следующие условия $\alpha_{i,k} = \beta_i \gamma_k$, $X(i,k) = i\Delta_x$, $Y(i,k) = k\Delta_y$. Так как сцена и шум неизменны, то временных частот ϕ_t в спектре изображения нет. Поэтому исключим их из рассмотрения.

Тогда получим

$$H(\phi_x, \phi_y) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{k=0}^{K-1} \beta_i \gamma_k e^{-j[\phi_x i + \phi_y k]} = \sum_{i=0}^{I-1} \beta_i e^{-j[\phi_x i]} \sum_{k=0}^{K-1} \gamma_k e^{-j[\phi_y k]} = H1(\phi_x) H2(\phi_y). \quad (3)$$

На рис. 2 приведены результаты моделирования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $H1(\phi_x)$ при $\beta_i = \gamma_k = 1$ для трех случаев: $I = 2$; $I = 3$; $I = 4$. Аналогично с изменением значения K будет изменяться $H2(\phi_y)$.

Как видно из рис. 2, полоса пропускания АЧХ сужается при увеличении значений I и K . Таким образом, каждый раз после неразрушающего считывания и оценки результатов фильтрации, последовательно увеличивая значения I и K , можно точно определить момент окончания обработки. Например, если в момент наблюдения для достижения требуемого уровня подавления ВЧ шумов достаточно, чтобы $I = K = 2$, а предельное значение $I = K = 4$, то предлагаемая реализация ДАС будет в 4 раза быстрее.

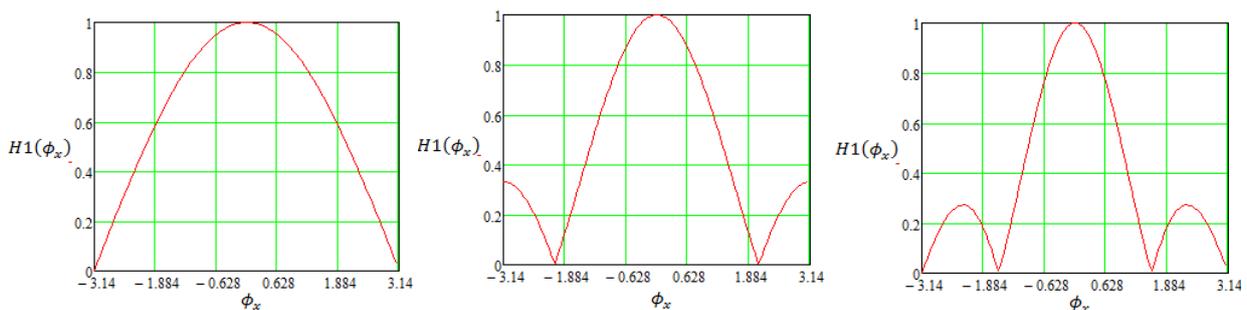


Рис. 2. АЧХ ДАС при $I = 2, 3, 4$

Неразрушающее считывание также позволяет реализовать дискретные рекурсивные фильтры. Это будет направлением дальнейших исследований.

Таким образом, переход на КМОП-матрицы позволил расширить функциональный диапазон ДАС и уменьшить время обработки.

Библиографический список

1. Пахомов, А. Н. Состояние и перспективы систем активного зрения / А. Н. Пахомов // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 2. – С. 57–65.
2. Перспективные методы обработки информации : монография / под ред. проф. П. Г. Горева. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена : Нобелистика, 2004. – 478 с.
3. Пат. 2313189 Российская Федерация, МПК H04N5/14. Способ пространственно-временной обработки изображений на основе матриц фоточувствительных приборов с зарядовой связью и устройство для его реализации / Богословский А. В., Строев В. М., Пахомов А. Н., Жигулина И. В. ; заявитель и патентообладатель Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиоэлектроники (военный институт). – № 2006101359/09 ; заявл. 17.01.2006 ; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 31.
4. Пат. 2569811 Российская Федерация, МПК H04N 5/335, H01L 27/148, G06T 1/00. Способ пространственно-временной обработки изображений на основе матриц фоточувствительных приборов с зарядовой связью / Строев В. М., Фесенко А. И., Федюнин П. А., Куликов А. Ю. ; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации. – № 2014120026/08 ; заявл. 19.05.2014 ; опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33.
5. Шевердин, А. Технологические инновации КМОП камер Omnivision – оптимальный выбор для высокообъемных применений / А. Шевердин // Компоненты и технологии. – 2008. – № 1. – С. 71–78.
6. Верещагин, И. К. Введение в оптоэлектронику : учеб. пособие для вузов / И. К. Верещагин, Л. А. Косяченко, С. М. Конин. – М. : Высш. шк., 1991. – 191 с.
7. Телевизионная камера со сверхвысокой разрешающей способностью ФРАЕ.468425.023. Особое конструкторско-технологическое бюро «Омега». – URL: <http://www.oktb-omega.ru/index.php?go=Content&id=6>

Строев Владимир Михайлович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра биомедицинской техники,
Тамбовский государственный
технический университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: stroev2006@yandex.ru

Stroev Vladimir Mikhaylovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of biomedical engineering,
Tambov State Technical University
(392000, 106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Комбарова Ирина Николаевна

аспирант,
Тамбовский государственный
технический университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: candy26-05@yandex.ru

Kombarova Irina Nikolaevna

postgraduate student,
Tambov State Technical University
(392000, 106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

УДК 621.382.049

Строев, В. М.

Дискретно-аналоговый спецпроцессор на основе фоточувствительных КМОП-матриц / В. М. Строев, И. Н. Комбарова // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 89–94. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-12.

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

УДК 62–192 + 656.1

DOI 10.21685/ 2307-4205-2018-2-13

Р. С. Литвиненко, П. П. Павлов, А. Э. Аухадеев

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА ЕГО ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ

R. S. Litvinenko, P. P. Pavlov, A. E. Aukhadееv

EVALUATION OF EFFECT RELIABILITY INFLUENCE ON CROSSING CAPACITY OF GROUND CITY ELECTRIC TRANSPORT

Аннотация. Описана методика оценки пропускной способности элементов наземной городской электротранспортной системы с учетом надежности ее инфраструктуры, основанная на использовании в качестве коэффициента надежности комплексного показателя – коэффициента оперативной готовности. Городская электротранспортная система с позиций системного подхода рассматривается как сложная техническая система, состоящая из большого числа элементов, объединенных в подсистемы (тяговых единиц, тяговых подстанций, контактной сети; рельсовой линии и подрельсового основания), непосредственно участвующие в передаче и превращении электроэнергии в механическую работу тяговых электродвигателей. Начиная с 2010 г. предложенный подход учета надежности элементов транспортной инфраструктуры был апробирован при расчетах наличной пропускной способности железнодорожного транспорта. Поэтому существует объективная необходимость адаптации подобных решений к современным условиям пассажироперевозок городским электротранспортом. Для решения этой задачи помимо введения коэффициента оперативной готовности оценивания пропускной способности элементов инфраструктуры маршрутных линий городского электротранспорта.

Abstract. The article describes the method of estimating the capacity of the terrestrial elements of urban electric transport system taking into account the reliability of its infrastructure. It is based on the use as a coefficient of reliability of a complex indicator – the coefficient of operational readiness. The city electric transport system from the viewpoint of the system approach is considered as a complex technical system. It consists of a large number of elements combined in a subsystem (traction units traction substations, catenary, rail and rail base line), which are directly involved in the transmission and transformation of electric energy into mechanical work traction motors. Beginning in 2010, the proposed approach taking into account the reliability of transport infrastructure elements was tested in the calculation of cash capacity of rail transport. Therefore, there is an objective need to adapt these solutions to modern conditions of passenger transportation by urban electric transport. To solve this problem in addition to the introduction of the coefficient of operational readiness assessment bandwidth infrastructures routing lines of urban electric transport is offered to produce in the daily interval of time, rather than in the time, as was done previously. The described method allows practically to estimate the predicted traffic figures, and the correspondence of transport line infrastructure el-

трического транспорта предлагается производить в суточном интервале времени, а не в часовом, как делалось ранее. При создании новых пассажирских маршрутов или модернизации старых описанная методика позволяет практически оценить прогнозируемые показатели дорожного движения и соответствие элементов инфраструктуры транспортной линии возможностям планируемых к использованию тяговых единиц.

Ключевые слова: надежность, городская электро-транспортная система, наземная, пропускная способность.

elements to the possibilities of traction units planned for use when creating new passenger routes or upgrading old ones.

Key words: reliability, urban public electric transportation system, overground, bandwidth capacity.

Введение

Городской электрический транспорт (ГЭТ) предназначен для осуществления городских перевозок пассажиров и может включать такие виды городского транспорта с электрическим приводом колес, как трамвай, троллейбус, метрополитен, электробусы, монорельсовый электрический транспорт и т.д. Проектирование городской электротранспортной системы (ГЭТС) осуществляют с учетом обеспечения комфортабельной перевозки пассажиров к месту назначения в минимально короткие сроки. Основными преимуществами этого вида транспорта являются высокая производительность и экологичность.

Важнейшим параметром оценки транспортной линии является ее пропускная способность, а в совокупности с провозной способностью она определяет место транспортного комплекса в общей системе городского пассажирского транспорта.

Под пропускной способностью транспортной линии или полосы движения ГЭТ понимается наибольшее количество единиц подвижного состава, которое может быть пропущено через ее поперечное сечение в одном направлении в течение одного часа [1]. Пропускная способность представляет собой максимальную интенсивность движения J_{\max} транспортных средств [2]

$$J = \frac{N_{\text{дв}}}{t},$$

где $N_{\text{дв}}$ – количество транспортных единиц (ТЕ), проходящих через поперечное сечение дороги или полосы движения в единицу времени t .

Пропускная способность элементов инфраструктуры транспортной линии наземного ГЭТ

Пропускная способность зависит от частоты расположения транспортных узлов, пересечений на линиях и организации движения на них, а также от пропускной способности остановочных пунктов и принятой системы организации движения. Пропускная способность наземного ГЭТ может определяться для перегона, транспортного узла или перекрестка, остановочного пункта. На величину пропускной способности оказывают влияние скорость и состав транспортных потоков на отдельных участках (перегонах), интервал движения подвижного состава, количество пересекающихся направлений и конфигурация узлов пересечений, плотность пешеходного движения и другие факторы.

При определении практической величины пропускной способности ГЭТ необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на пропускную способность транспортной линии: число остановочных пунктов, наличие пересечений с другими линиями и улицами на одном уровне; наличие крутых спусков и подъемов, влияющих на скорость движения; условия видимости на перекрестках и способ регулирования движения и др.

Пропускная способность перегона $\Pi_{\text{п}}$ для одной полосы в одном направлении (ед./ч) теоретически определяется по формуле [3]

$$\Pi_{\Pi} = \frac{3600V}{t_p V + \frac{V^2}{2b} + l + l_0}, \quad (1)$$

где V – скорость движения на перегоне, м/с; t_p – время реакции водителя (до 1,5 с), с; b – замедление при экстренном торможении, м/с²; l – длина подвижного состава, м; l_0 – зазор безопасности между следующими друг за другом транспортными единицами, обычно принимается равным длине поезда, м.

Значение 3600 в знаменателе необходимо, чтобы привести величину пропускной способности от единиц в секунду к единицам в час.

Расчет пропускной способности по формуле (1) ведется для однородного потока. В том случае, когда транспортный поток является разнородным, то ограничиваются величиной Π_{Π} , соответствующей подвижному составу с более низкими динамическими характеристиками. Такая пропускная способность является чисто теоретической и в значительной степени превосходит реальную, так как подразумевает непрерывное движение ГЭТ без остановок.

На рис. 1 представлена зависимость пропускной способности перегона, рассчитанной по формуле (1) от скорости ГЭ. В качестве исходных данных были взяты следующие параметры: $t_p = 0,5$ с, $b = 2$ м/с²; $l = l_0 = 16,5$ м для трамвая 71-911; и $l = l_0 = 12$ м для троллейбуса ПТ-6231.

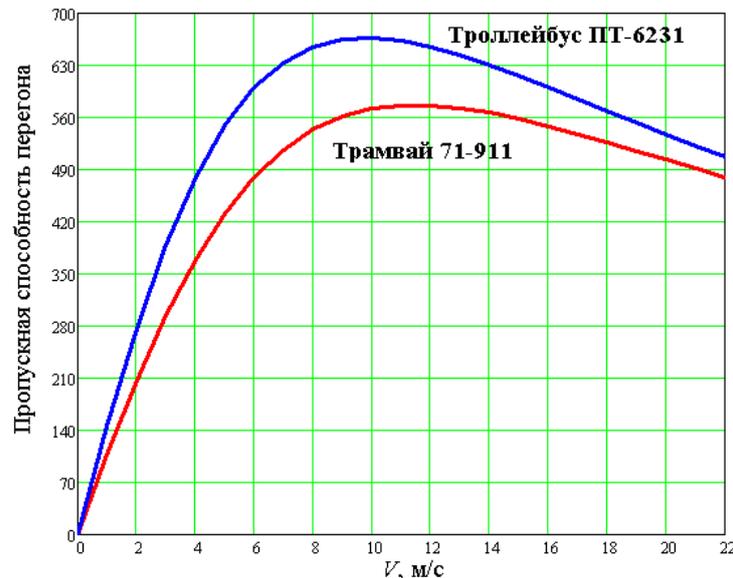


Рис. 1. Зависимость пропускной способности перегона от скорости подвижного состава

Из рисунка видно, что максимальная пропускная способность для трамвая 71-911 соответствует скорости равной 12 м/с (43,2 км/ч), которая значительно ниже конструкционной скорости, составляющей 75 км/ч. Для троллейбуса ПТ-6231 оптимальная скорость также значительно ниже конструкционной, поэтому дальнейшее повышение пропускной способности перегона будет возможно за счет увеличения тормозного замедления b , которое в реальных условиях эксплуатации зависит от сцепления колес с путевым устройством и ограничено требованиями безопасности. Изменение пропускной способности в зависимости от величины тормозного замедления представлено на рис. 2.

Анализ представленной зависимости показывает, что с увеличением величины тормозного замедления возрастает и оптимальная скорость подвижного состава, которой будет соответствовать максимальная пропускная способность перегона.

Пропускную способность линий ГЭТ обычно лимитирует пропускная способность остановочных пунктов $\Pi_{\text{он}}$ [1, 4], которая определяется по формуле

$$\Pi_{\text{он}} = \frac{3600}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4},$$

где t_1 – время, затрачиваемое ТЕ на подход к остановочному пункту, с; t_2 – продолжительность высадки и посадки пассажиров, с; t_3 – продолжительность объявления водителем о прекращении посадки и закрытии дверей (4...8 с); t_4 – продолжительность освобождения остановочного пункта, с.

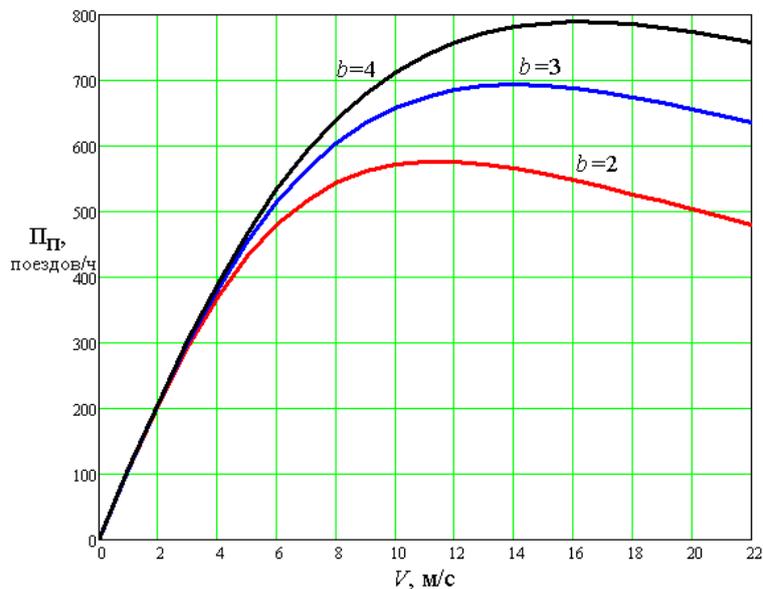


Рис. 2. Зависимость пропускной способности перегона от величины тормозного замедления подвижного состава

Так как надежность остановочных пунктов и промежуточных станций транспортных линий как инженерных сооружений при надлежащем содержании не оказывает значительного влияния на эффективность функционирования электрического транспорта, а также на его пропускную способность, в дальнейшем в рамках статьи эти элементы инфраструктуры рассматриваться не будут.

Несмотря на то, что пропускную способность транспортной линии, как правило, ограничивает пропускная способность остановочных пунктов [1, 2, 4], в городских условиях различные маршруты могут иметь общие направления (пересекаться), поэтому требуемая пропускная способность будет отличаться от наличной и должна определяться для всех элементов транспортной линии (перегоны, перекрестки и т.д.).

Пропускная способность перекрестков. Пропускная способность *регулируемых* перекрестков определяется по формуле

$$\Pi_{\text{пер}} = \frac{3600(t_3 - \Delta t)}{T_c t_p}, \tag{2}$$

где t_3 – продолжительность зеленой фазы светофора, с; Δt – время между включением разрешающего сигнала светофора и пересечением стоп-линии первым транспортным средством (1...3 с);

$t_p = \frac{l_n + l_6}{V_y}$ – расчетный интервал прохождения транспортных средств через перекресток, с;

V_y – установленная скорость движения ТЕ через перекресток; T_c – продолжительность цикла светофорного регулирования (обычно 40...75 с, при желтой фазе 3...5 с).

В формуле (2) показатель $\frac{3600}{T_c}$ определяет число циклов светофорного регулирования в час, а

$\frac{t_3 - \Delta t}{t_p}$ – количество ТЕ, которое может быть пропущено за один цикл светофорного регулирования.

Таким образом, на величину пропускной способности регулируемого перекрестка основное влияние оказывают T_c продолжительность цикла светофорного регулирования и доля в нем разрешенного

сигнала t_3 . Чем сложнее будет светофорный цикл, тем меньше будет отношение $\frac{t_3}{T_c}$ и, соответственно, ниже пропускная способность [2].

Пропускная способность перекрестка с *принудительной* системой регулирования для троллейбуса

$$\Pi_{\text{пр.рег}} = \frac{\Pi_{\text{рег}}}{3}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что для троллейбуса пропускная способность перекрестка с *принудительной* системой регулирования в три раза меньше, чем у регулируемого перекрестка.

Пропускная способность перекрестка с *принудительной* системой регулирования для трамваев определяется произведением количества ТЕ, пропускаемых за один светофорный цикл, на количество циклов светофора в часе [5]

$$\Pi_{\text{пр.рег}} = \frac{3600K}{T_c}, \quad (4)$$

где K – количество ТЕ, пропускаемых за один цикл.

Пропускная способность трамвайного узла (ответвление или примыкание) определяется по формуле [1]

$$\Pi_{\text{уз}} = \frac{3600V}{(l_{\text{п}} + l_{\text{к}}) + t_{\text{в}}V_{\text{с.п}} + \frac{V_{\text{с.п}}^2}{2b}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{к}}$ – расстояние между серийным и шунтовым контактами (принимается 50 м); $t_{\text{в}}$ – время реакции водителя (0,6...0,8 с) и срабатывания устройства (около 1 с); $V_{\text{с.п}}$ – скорость прохождения участка со стрелочным переводом (при движении со стороны крестовины 15 км/ч, в сторону крестовины 5 км/ч).

Результативная пропускная способность ГЭТС формируется выбором, в зависимости от вида ТЕ, минимальной из совокупностей значений пропускных способностей элементов, соответствующих транспортных маршрутов. При этом необходимо предусмотреть наличие резерва между наличной и потребной пропускными способностями. В зарубежной литературе [6, 7] в этих целях использован показатель доступной пропускной способности – разницы между предельной пропускной способностью, реализуемой на практике, и фактическим объемом трафика ТЕ.

Анализ существующего научно-методического аппарата оценки пропускной способности ГЭТ

Анализ существующего научно-методического аппарата оценки пропускной способности ГЭТ и его сравнение с методологией расчета пропускной способности железных дорог [8] позволяют сделать ряд замечаний:

1. Существующие методы расчета пропускной способности транспортных линий ГЭТ достаточно устарели и не учитывают современного состояния элементов ГЭТС. Публикации по этой проблематике относятся к 60–80-м гг. прошлого века. Исследования пропускной способности железных дорог в отличие от ГЭТ были актуализированы в начале 2000-х гг., в частности, в 2010 г. была утверждена Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог [8].

2. В качестве временных единиц измерения пропускной способности транспортных линий ГЭТ приняты часы, а провозной способности – соответственно перевезенное количество пассажиров в час. Так как пассажиропотоки в сетях ГЭТС меняются по часам суток, дням недели, месяцам и сезонам года, брать в качестве временного интервала один час не корректно. Необходимо проводить оценивание этих показателей хотя бы для суточного периода, чтобы повысить точность и достоверность получаемых результатов.

3. Исследования, проведенные во ВНИИЖТе в 60–70 гг. прошлого века, показали, что на использование пропускной способности участков железной дороги влияет уровень надежности техни-

ческих средств (локомотивов, вагонов, путевых устройств, СЦБ и др.) [9]. Рост отказов привел к тому, что их стали учитывать при расчете пропускной способности соответствующим коэффициентом надежности α_n [8, 10]

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{I},$$

где $t_{\text{техн}}$ – продолжительность свободного от поездов промежутка времени, предоставляемого для выполнения работ по текущему содержанию пути, устройств, сооружений и т.д.); I – межпоездной интервал.

Аналогично железнодорожному транспорту, отказы элементов ГЭТ и инфраструктуры транспортной линии оказывают значительное влияние на эффективность пассажирских перевозок [11, 12], поэтому возникает объективная необходимость учета влияния надежности на пропускную способность ГЭТС. Рассмотрение этого вопроса должно проводиться в комплексе с учетом взаимодействия и взаимного влияния всех составляющих процесса пассажироперевозок [13, 14].

Подход к оценке пропускной способности элементов ГЭТС с учетом надежности

Таким образом, формулы (1)–(5) оценки пропускной способности элементов транспортной инфраструктуры ГЭТС в суточном интервале времени с учетом влияния отказов примут следующий вид:

– пропускная способность перегона наземной линии ГЭТ

$$\Pi_n^* = \frac{3600V(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{t_p V + \frac{V^2}{2b} + l + l_0};$$

– пропускная способность регулируемых перекрестков наземной линии ГЭТ

$$\Pi_{\text{рег}}^* = \frac{3600(t_3 - \Delta t)(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{T_c t_p};$$

– пропускная способность перекрестка с принудительной системой регулирования для троллейбуса

$$\Pi_{\text{пр.рег}}^* = \frac{1200(t_3 - \Delta t)(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{T_c t_p};$$

– пропускная способность перекрестка с принудительной системой регулирования для трамвая

$$\Pi_{\text{пр.рег}}^* = \frac{3600K(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{T_c};$$

– пропускная способность трамвайного узла

$$\Pi_{\text{уз}}^* = \frac{3600V(24 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{(l_n + l_k) + t_v V_{\text{с.п}} + \frac{V_{\text{с.п}}^2}{2b}}.$$

Для приведения часовой пропускной способности к суточному интервалу был введен множитель $(24 - t_{\text{техн}})$, где $t_{\text{техн}}$ – продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых работ по текущему содержанию пути, устройств и сооружений. Как правило, эти мероприятия выполняются во время ночного перерыва в работе ГЭТ и составляют от 4 до 6 ч. В отличие от железной дороги для проведения этих мероприятий в системе ГЭТ нет необходимости искать возможность предоставления технологических «окон» в графике движения поездов, что значительно облегчает работу ремонтных бригад. В то же время проведение неплановых ремонтов по устранению внезапных отказов инфраструктуры ГЭТ может привести к остановке процесса пасса-

жироперевозки на участке, тогда как железнодорожный транспорт имеет возможность в случае грузовых перевозок изменить маршрут либо ликвидировать отставания за счет последующего увеличения скорости.

Рассмотрим, какой физический смысл вкладывается в понятие коэффициента надежности α_n . В Инструкции по расчету наличной пропускной способности железных дорог [8] под коэффициентом надежности α_n понимается коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств (инфраструктуры и подвижного состава), и даются фиксированные значения в зависимости от числа главных путей (однопутные или двухпутные линии) на перегоне и вида тяги (электрическая или тепловозная тяга). Автор [15] в качестве показателя надежности $R(t)$ технических средств железнодорожного транспорта использует следующее выражение:

$$R(t) = K_r P(t), \quad (6)$$

где K_r – коэффициент готовности (вероятность того, что в произвольный момент времени техническая система исправна и готова к работе); $P(t)$ – вероятность безотказной работы технической системы; t – длительность заданного интервала времени.

В терминах теории надежности техники нет такого показателя, как коэффициент надежности, но исходя из выражения (6) и ГОСТа [16], можно сделать вывод, что в качестве показателя надежности технических средств железнодорожного транспорта используется коэффициент оперативной готовности, так как при определенных условиях он представляет собой произведение коэффициента готовности и вероятности безотказной работы. Под коэффициентом оперативной готовности техники [16] понимается вероятность того, что изделие в данный момент времени t_1 находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит требуемую функцию при данных условиях в интервале (t_1, t_2) . В связи с вышеизложенным под коэффициентом надежности α_n , используемым при оценке пропускной способности транспортной линии ГЭТ, будем понимать коэффициенты оперативной готовности $K_{o.g.}(t_1, t_2)$, соответствующих элементов транспортной инфраструктуры ГЭТС.

В работах [11, 12] было предложено рассматривать ГЭТС с позиций системного подхода как сложную техническую систему, состоящую из большого числа элементов, объединенных в следующие подсистемы, непосредственно участвующие в передаче и превращении электроэнергии в механическую работу тяговых электродвигателей в условиях воздействия внешней среды:

- подсистема тяговых единиц (парк ТЕ);
- подсистема тяговых подстанций;
- подсистема контактной сети;
- подсистема рельсовой линии (для трамвая);
- подсистема подрельсового основания (для трамвая).

Предложенный системный подход к рассмотрению ГЭТС дает возможность решать задачи по повышению эффективности функционирования с учетом взаимодействия ее составляющих, так как, усовершенствуя только элементы тягового подвижного состава без модернизации обеспечивающей транспортной инфраструктуры, достигнуть повышения каких-либо количественных показателей дорожного движения не получится.

С учетом этих положений и с целью учета влияния уровня надежности различных компонентов транспортной инфраструктуры на пропускную способность транспортной линии ГЭТС формулы для определения коэффициента надежности по типам ЭТ примут следующий вид:

- для троллейбусной линии

$$\alpha_n^{\text{тролл}}(t_1, t_2) = K_{o.g.}^{\text{тролл}} = \prod_{i=1}^2 K_{o.g.i}(t_1, t_2);$$

- для трамвайной линии

$$\alpha_n^{\text{трам}}(t_1, t_2) = K_{o.g.}^{\text{трам}} = \prod_{i=1}^4 K_{o.g.i}(t_1, t_2),$$

где $K_{o.r.1}(t_1, t_2)$ – коэффициент оперативной готовности тяговых подстанций; $K_{o.r.2}(t_1, t_2)$ – коэффициент оперативной готовности участка контактной сети; $K_{o.r.3}(t_1, t_2)$ – коэффициент оперативной готовности участка рельсовой линии; $K_{o.r.4}(t_1, t_2)$ – коэффициент оперативной готовности участка подрельсового основания.

Используемые показатели надежности в настоящее время регламентированы для железнодорожного транспорта и его инфраструктуры [17–20], но с учетом особенностей эксплуатации могут быть использованы для ГЭТ. Таким образом, применяя коэффициент оперативной готовности в качестве коэффициента надежности соответствующих компонентов (контактной сети, тяговых подстанций, рельсовой линии и подрельсового основания) ГЭТС, находящихся в пределах занимаемых элементами транспортной линии (перегоны, перекрестки, узлы и т.д.), можно скорректировать величину наличной пропускной способности пассажирских маршрутов.

Заключение

Таким образом, проанализировав влияние надежности всех подсистем в составе ГЭТС на пропускную и провозную способности, можно определить ее место в структуре городских пассажирских перевозок. Предложенный подход может быть использован для выявления наименее надежных элементов транспортной инфраструктуры, оказывающих влияние на процесс пассажироперевозок ГЭТС, и в случае необходимости принять меры по повышению их эффективности. При создании новых пассажирских маршрутов или модернизации старых описанная методика позволяет практически оценить прогнозируемые показатели дорожного движения и соответствие элементов инфраструктуры транспортной линии возможностям планируемых к использованию ТЕ.

Библиографический список

1. *Коссой, Ю. М.* Организация движения и пассажирских перевозок на городском электрическом транспорте : учебник / Ю. М. Коссой, В. А. Поначугин, В. Н. Ширин. – М. : Академия, 2002. – 272 с.
2. *Ефремов, И. С.* Теория городских пассажирских перевозок : учеб. пособие для вузов / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. А. Юдин. – М. : Высш. школа, 1980. – 535 с.
3. *Самойлов, Д. С.* Городской транспорт : учебник для вузов / Д. С. Самойлов. – М. : Стройиздат, 1983. – 384 с.
4. *Фишельсон, М. С.* Городские пути сообщения : учеб. пособие для вузов / М. С. Фишельсон. – М. : Высш. шк., 1980. – 296 с.
5. *Томили, А. И.* Организация движения трамваев и троллейбусов / А. И. Томили. – М. : Стройиздат, 1969. – 243 с.
6. *Браништов, С. А.* Методы оценки пропускной способности железных дорог. Часть 1. Аналитические методы оценки и анализа использования / С. А. Браништов, А. М. Ширванян, Д. А. Тумченко // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 5. – С. 51–57.
7. *Браништов, С. А.* Методы оценки пропускной способности железных дорог. Часть 1. Аналитические методы оценки и анализа использования / С. А. Браништов, А. М. Ширванян, Д. А. Тумченко // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 6. – С. 68–74.
8. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог, утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 128 от 16.11.2010. – 305 с.
9. *Горелик, А. В.* Модели и методы анализа надежности и эффективности функционирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта / А. В. Горелик, И. А. Журавлев, А. С. Веселова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 174–176.
10. *Левин, Д. Ю.* Расчет и использование пропускной способности железных дорог : монография / Д. Ю. Левин, В. Л. Павлов. – М. : ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 364 с.
11. *Литвиненко, Р. С.* Исследование технической надежности городской электротранспортной системы / Р. С. Литвиненко, А. Э. Аухадеев, О. А. Филина // Транспорт: наука, техника, управление. – 2017. – № 8. – С. 60–71.
12. *Павлов, П. П.* К вопросу оценки надежности электротранспортной системы города / П. П. Павлов, Р. Г. Идиятуллин, Р. С. Литвиненко // Бюллетень транспортной информации. – 2017. – № 5 (263). – С. 23–26.
13. *Кашцев, Н. А.* Некоторые закономерности процесса синтеза информационно-управляющих комплексов с позиций свойств сложных систем / Н. А. Кашцев, В. С. Чаплинский // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 11–15.
14. *Андреев, К. П.* Совершенствование городской маршрутной сети / К. П. Андреев // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 102–106. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-15.

15. *Ивницкий, В. А.* Надежность технических средств железнодорожного транспорта и ее связь с пропускной способностью направлений / В. А. Ивницкий // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 1. – С. 6–9.
16. ГОСТ Р 53480–2009. Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. впервые. – М. : Стандартинформ, 2010. – 33 с.
17. ГОСТ Р 55444–2013. Железнодорожное электроснабжение. Номенклатура показателей надежности и функциональной безопасности. – Введ. впервые. – М. : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
18. ГОСТ Р 55443–2013. Железнодорожный путь. Номенклатура показателей надежности и функциональной безопасности. – Введ. впервые. – М. : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
19. ГОСТ Р 54461–2011. Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения. – Введ. впервые. – М. : Стандартинформ, 2012. – 20 с.
20. ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. впервые. – М. : Стандартинформ, 2014. – 32 с.

Литвиненко Руслан Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электротехнических комплексов и систем,
Казанский государственный
энергетический университет
(420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51)
E-mail: litrus@km.ru

Павлов Павел Павлович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электротехнических
комплексов и систем,
Казанский государственный
энергетический университет
(420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51)
E-mail: pavlov2510@mail.ru

Аухадеев Авер Эрикович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электротехнических комплексов и систем,
Казанский государственный
энергетический университет
(420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51)
E-mail: auhadееvkgma@rambler.ru

Litvinenko Ruslan Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of electrotechnical complexes
and systems,
Kazan State Power Engineering University
(420066, 51 Krasnoselskaya street, Kazan, Russia)

Pavlov Pavel Pavlovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of electrotechnical complexes
and systems,
Kazan State Power Engineering University
(420066, 51 Krasnoselskaya street, Kazan, Russia)

Auhadeev Aver Erikovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of electrotechnical complexes
and systems,
Kazan State Power Engineering University
(420066, 51 Krasnoselskaya street, Kazan, Russia)

УДК 62–192 + 656.1

Литвиненко, Р. С.

Оценка влияния надежности элементов наземного городского электрического транспорта на его пропускную способность / Р. С. Литвиненко, П. П. Павлов, А. Э. Аухадеев // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 95–103. – DOI 10.21685/ 2307-4205-2018-2-13