

## ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ АНАЛОГОВЫХ БЛОКОВ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ\*

Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; crems@crems.jesby.tstu.ru*

**Ключевые слова:** аналоговый блок; внешний фактор; информационно-измерительная система; метрологическая надежность; метрологическая характеристика; метрологический ресурс; окружающая среда; элементная база.

**Аннотация:** Разработан метод повышения метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем, заключающийся в определении оптимальных условий эксплуатации, обеспечивающих максимальный уровень метрологического ресурса аналоговых блоков как основного показателя их метрологической надежности. Метод основывается на математическом моделировании нестационарных случайных процессов изменения во времени метрологических характеристик аналоговых блоков информационно-измерительных систем, а также включает в себя процедуру параметрической оптимизации внешних факторов окружающей среды.

Практическая реализация предложенного метода проиллюстрирована на примере исследования типового аналогового блока – преобразователя напряжение–частота. Показано, что применение данного метода позволяет более чем на 80 % увеличить исследуемый показатель метрологической надежности.

---

Среди различных групп средств измерений широкое распространение получили информационно-измерительные системы (ИИС). Сложность и ответственность выполняемых ими функций делают задачу обеспечения их высокого уровня метрологической надежности (МН) крайне актуальной [1, 2]. Метрологическая надежность является показателем качества ИИС, определяющим их свойство сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм при эксплуатации в заданных режимах и условиях использования, техническом обслуживании, хранении и транспортировании [2], то есть МН определяется характером и темпом изменения нормируемых МХ ИИС. Основным количественным показателем МН является метрологический ресурс (МР)  $t_p$ , определяемый временем пересечения реализаций нестационарного случайного процесса изменения во времени МХ границ поля допуска [3].

Как показывают теоретические и практические исследования [2, 3], МН ИИС определяется метрологической надежностью входящих в их состав аналоговых блоков (АБ), так как именно в АБ протекают основные процессы преобразования измеряемых сигналов. Элементная база (ЭБ) АБ имеет тенденцию к старению и, как результат, к отклонению значений своих параметров от номиналов, что приводит к искажению измеряемого сигнала и возрастанию основной относительной погрешности измерения  $\delta$ . При этом имеет место снижение МР, как основного показателя МН ИИС.

---

\* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах», г. Тамбов, 25 – 27 апреля 2016 г.

Воздействие на ИИС внешних факторов окружающей среды (ОС) ускоряет процесс старения ЭБ АБ, снижая, таким образом, уровень их МР. Следовательно, уменьшить скорость старения ЭБ АБ и увеличить МР ИИС возможно, обеспечив наиболее благоприятные условия их эксплуатации.

Таким образом, формируется задача поиска таких значений внешних факторов ОС, при которых наблюдается максимальное значение МР. Решение данной задачи включает в себя следующие основные этапы:

- оценку МН АБ ИИС;
- выбор из массива внешних факторов ОС наиболее значимых, изменение которых наиболее значительно отражается на изменении МР исследуемого АБ ИИС;
- поиск значений выбранных наиболее значимых факторов ОС, обеспечивающих максимальную величину МР.

Оценка МН АБ ИИС осуществляется с применением метода аналитико-вероятностного прогнозирования [2, 3], основанного на построении математических моделей (ММ) МХ проектируемых АБ с учетом априорных знаний об изменении параметров ЭБ в процессе предстоящей эксплуатации и влияния на АБ внешних факторов.

Начальным этапом метода является моделирование ЭБ АБ

$$\xi_i(\bar{\varphi}, t) = f_1(\bar{\varphi}, t, \xi_{0i}), \quad (1)$$

где  $\xi_i(\bar{\varphi}, t)$  – значение параметра  $i$ -го элемента в момент времени эксплуатации  $t$  при воздействии внешних факторов ОС  $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ ;  $\bar{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$  – вектор внешних факторов ОС,  $m$  – число внешних факторов ОС;  $\xi_{0i}$  – номинальное значение параметра  $i$ -го элемента.

Далее строится ММ функционирования ИИС, представляющая функциональную зависимость выходного сигнала  $y$  от значений входного  $x$ , параметров ЭБ  $\bar{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$  и внешних влияющих факторов  $\bar{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ :

$$y = f_2(x, \bar{\xi}, \bar{\varphi}). \quad (2)$$

Как правило, в качестве исследуемой МХ для АБ ИИС рассматривается основная относительная погрешность  $\delta$ .

Тогда на основе выражения (2) ММ МХ имеет вид

$$\delta = f_3(\bar{\xi}, \bar{\varphi}, t). \quad (3)$$

Построенная ММ вида (3) учитывает изменение параметров ЭБ АБ под воздействием факторов ОС и используется далее в процедуре статистического моделирования МХ в различные моменты времени эксплуатации. Алгоритм моделирования состоит из последовательного расчета характеристик закона распределения значений параметров ЭБ исследуемых блоков и моделирования реализаций МХ в различных временных сечениях.

На основе результатов статистического моделирования строится ММ изменения во времени МХ [3], представляющая собой совокупность аналитических зависимостей, полученных для функций изменения во времени математического ожидания  $m_\delta(t)$  и функций, характеризующих изменение во времени границ отклонений возможных значений исследуемой МХ от ее математического ожидания  $\psi_{\pm\sigma}(t)$ :

$$\begin{cases} m_\delta(\bar{\varphi}, t); \\ \psi_{\pm\sigma}(\bar{\varphi}, t) = m_\delta(\bar{\varphi}, t) + c \sigma_\delta(\bar{\varphi}, t), \end{cases} \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициент, выбираемый в зависимости от уровня доверительной вероятности,  $c = 3$  при  $P = 0,9973$ .

Построенная ММ (4) является основой для оценки МР путем экстраполяции зависимостей (4) на область будущих значений времени эксплуатации. Точность полученных результатов прогнозирования будет зависеть от адекватности применяемых ММ (1) для ЭБ АБ, а также от адекватности построенных ММ МХ.

Следующим этапом разработанного метода является выявление из массива  $m$  внешних факторов ОС наиболее значимых, изменение которых наиболее значительно отражается на изменении МХ исследуемого АБ ИИС.

Для оценки степени влияния параметров ОС на величину нормируемой МХ находится значение частной производной вида

$$G(\varphi_j) = \frac{\bar{G}(\varphi_j)\sigma_{\varphi_j}}{\sqrt{\sum_j \bar{G}^2(\varphi_j)\sigma_{\varphi_j}^2}}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

где  $\varphi_j$  –  $j$ -й параметр ОС;  $\sigma_{\varphi_j}$  – среднеквадратическое отклонение значения  $j$ -го параметра ОС;  $\bar{G}(\varphi_j)$  – значения частных производных, вычисленных от функции изменения во времени МХ  $\delta$  при заданных значениях внешних факторов по соответствующим параметрам ОС:

$$\bar{G}(\varphi_j) = \left. \frac{\partial \delta}{\partial \varphi_j} \right|_{\varphi_j = \varphi_{j0}}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

Определив наиболее значимые факторы ОС, выполняется поиск таких их значений, при которых достигается максимальный МР ИИС. Осуществлять данный поиск целесообразно с использованием метода параметрической оптимизации Хука-Дживса [4, 5]. В качестве целевой функции выбирается максимальное значение МР  $t_{p\max}$ .

Задаются начальные значения отобранных, наиболее значимых факторов ОС  $\varphi_1^{(0)}, \varphi_2^{(0)}, \dots, \varphi_r^{(0)}$  и значения начальных приращений  $\Delta\varphi_1^{(0)}, \Delta\varphi_2^{(0)}, \dots, \Delta\varphi_r^{(0)}$  данных факторов. Вычисляется значение целевой функции  $t_p^{(0)}$  в начальной точке, и исследуется ее окрестность путем вычисления значения  $t_p^{(1)}$  в следующей точке. То есть определяется вектор  $s$ , указывающий направление максимизации целевой функции [5]. Параметры  $\varphi_j^{(k)}$  увеличиваются с каждым шагом на заданное приращение  $\Delta\varphi_j^{(k)}$  в соответствии с вектором поиска  $s$ :

$$\varphi_j^{(k+1)} = \varphi_j^{(k)} + \lambda s_j \Delta\varphi_j^{(k)}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент, в общем случае пропорциональный номеру шага;  $\varphi_j^{(k)}$  – значение  $j$ -го параметра ОС в  $k$ -й точке поиска.

На каждом шаге процедуры поиска оптимальных значений внешних влияющих факторов ОС необходимо контролировать выполнение условия

$$y(x, \bar{\varphi}, \xi, t) \in A, \quad (8)$$

где  $y(x, \bar{\varphi}, \xi, t)$  – выходной сигнал АБ ИИС,  $\bar{\varphi} \in \Phi$ ;  $\bar{\varphi}$  – вектор внешних влияющих воздействий;  $\Phi$  – область значений внешних воздействующих факторов;  $A$  – область работоспособности исследуемого АБ.

Результаты оценки значимости внешних факторов ОС

Частная производная	$T$	$F$	$P$	$E$
$\bar{G}(\varphi_j)$	0,187	0,137	-0,954	0,138
$G(\varphi_j)$	0,536	0,654	-0,090	0,427

При выполнении условия  $t_p^{(k+1)} > t_p^{(k)}$  поиск продолжается, при его нарушении вновь производится поиск вокруг точки  $\varphi^{(k)}$  с целью определения нового вектора  $s$ . В случае нахождения такой точки  $\varphi^{(k)}$ , в которой наблюдается большее значение целевой функции  $t_p^{(1)}$  чем в точках  $\varphi_j^{(0)}, \varphi_j^{(1)}, \dots, \varphi_j^{(k-1)}$ , а шаги во всех направлениях от данной точки не дают большего значения МР, то принимается, что  $t_p^{(k)} = t_{p \max}$  [4, 5].

Реализация предложенного метода рассмотрена на примере типового аналогового блока, используемого в структуре информационно-измерительных систем контроля теплофизических характеристик объектов – преобразователя напряжение – частота.

Для оценки МР указанного блока построена многофакторная ММ изменения во времени основной относительной погрешности с учетом следующих внешних факторов: температуры  $T$ , влажности  $F$ , давления  $P$  и радиационного воздействия  $E$ . Структура и методика построения данной модели подробно изложены в [3].

Используя метод аналитико-вероятностного прогнозирования, определено, что МР исследуемого блока напряжение-частота при нормальных значениях факторов ОС ( $T = 20$  °С,  $F = 45$  %,  $P = 1$  атм,  $E = 50$  мкР/ч составляет 40500 ч).

Результаты определения наиболее значимых факторов ОС в соответствии с (5) представлены в табл. 1. Анализ приведенных данных позволяет считать, что наиболее значимые факторы, изменение которых существенно отражается на изменении МХ исследуемого блока, являются температура  $T$  и влажность  $F$ .

В соответствии с предложенным алгоритмом параметрической оптимизации найдены оптимальные значения температуры  $T_{\text{опт}}$  и влажности  $F_{\text{опт}}$  ОС, обеспечивающие максимальный уровень МР исследуемого блока:  $T_{\text{опт}} = 10...15$  °С,  $F_{\text{опт}} = 0 - 25$  %. Любые значения параметров ОС, принадлежащие указанным диапазонам, соответствуют максимальному значению МР АБ ИИС. За оптимальные параметры ОС целесообразно принять верхние границы указанных диапазонов, так как данные значения наиболее близки к нормальным условиям эксплуатации и, соответственно, легче обеспечиваются при функционировании ИИС.

При выбранных таким образом условиях эксплуатации рассчитано, что МР исследуемого блока преобразователь напряжение-частота при  $T = 15$  °С,  $F = 25$  %,  $P = 1$  атм,  $E = 50$  мкР/ч составляет 75700 ч. В сравнении с исходным значением МР, при применении рассмотренного метода, достигается повышение указанного показателя МН на 87 %.

Таким образом, разработанный метод позволяет значительно повысить метрологический ресурс аналоговых блоков, составляющих измерительный канал информационно-измерительных систем.

### *Список литературы*

1. Селиванова, З. М. Метод и интеллектуальная информационно-измерительная система для повышения точности допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов / З. М. Селиванова, К. С. Стасенко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 42 – 49. doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.042-049
2. Мищенко, С.В. Метрологическая надежность измерительных средств / С. В. Мищенко, Э. И. Цветков, Т. И. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2001. – 218 с.
3. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование при анализе метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 42 – 47.
4. Hooke, R. «Direct search» Solution of Numerical and Statistical Problems / R. Hooke, T. A. Jeeves // Journal of the Association for Computing Machinery (ACM). – 1961. – № 8(2). – P. 212 – 229.
5. Черноруцкий, И. Г. Методы оптимизации в теории управления : учеб. пособие / И. Г. Черноруцкий. – СПб. : Питер, 2004. – 256 с.

---

## **Improving Metrological Reliability of Analog Blocks of Information-Measuring Systems**

**T. I. Chernyshova, V. V. Tretyakov**

*Department “Designing of Electronic and Microprocessor Systems”,  
TSTU, Tambov, Russia; crems@crems.jesby.tstu.ru*

**Keywords:** analog block; external factor; information-measuring system; metrological reliability; metrological characteristic; metrological resource; environment; element base.

**Abstract:** The authors describe the developed method of improving metrological reliability of analog blocks of information-measuring systems. The proposed method involves finding optimum service conditions providing a maximum level of metrological resource of analog blocks as the main indicator of their metrological reliability. The method is based on mathematical modeling of non-stationary random processes of changing in time metrological characteristics of analog blocks of information-measuring systems, and includes the procedure of parametrical optimization of environmental factors.

The method consists of the following main stages: mathematical modeling of element base of the analog blocks, modeling of metrological characteristics of these blocks, statistical modeling of metrological characteristics in different times and by different external factors, and modeling of changing in time metrological characteristics of the analog blocks. The optimum values of external environmental factors were found using the Hooke-Jeeves parametrical optimization method.

The main environmental factors studied in the article are temperature, humidity, pressure and radioactive effects.

The practical realization of the proposed method is exemplified by the typical analog block – the voltage-frequency converter. It was found that using this block allows for more than 80 % increase in the investigated metrological reliability indicator.

## References

1. Selivanova Z.M., Stasenko K.S. [Method and Intellectual Data Measuring System to Increase the Accuracy of Pre-Commissioning Control of Heat-Insulating Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 42-49, doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.042-049 (In Russ., Abstract in Eng.)
2. Mishchenko S.V., Tsvetkov E.I., Chernyshova T.I. *Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv* [Metrological reliability of measuring devices], Moscow: Mashinostroenie, 2001, 218 p. (In Russ.)
3. Chernyshova T.I., Tret'yakov V.V. [Mathematical Modeling in the Analysis of Metrological Reliability of Analog Parts of Information-Measuring Systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 42-47. (In Russ., Abstract in Eng.)
4. Hooke R., Jeeves T.A. «Direct search» solution of numerical and statistical problems, *Journal of the Association for Computing Machinery (ACM)*, 1961, no. 8(2), pp. 212-229.
5. Chernoruckij I.G. *Metody optimizacii v teorii upravleniya* [Optimization Methods in Control Theory], St. Petersburg: Piter, 2004, 256 p. (In Russ.)

---

### Erhöhung der metrologischen Sicherheit der Analogblöcke der Informationsmesssysteme

**Zusammenfassung:** Es ist die Methode der Erhöhung der metrologischen Sicherheit der Analogblöcke der Informationsmesssysteme entwickelt. Die Methode wird auf der mathematischen Modellierung der nichtstationären zufälligen Prozesse der Veränderung in der Zeit der metrologischen Charakteristiken der Analogblöcke der Informationsmesssysteme gegründet und schließt die Prozedur der parametrischen Optimierung der äußerlichen Faktoren der Umwelt ein. Es ist gezeigt, dass die Anwendung der gegebenen Methode mehr als auf 80 % die untersuchte Kennziffer der metrologischen Sicherheit zu vergrößern zulässt.

---

### Augmentation de la fiabilité métrologique des blocs analogiques des systèmes informatiques de mesure

**Résumé:** Est élaborée une méthode de l'augmentation de la fiabilité métrologique des blocs analogiques des systèmes informatiques de mesure. La méthode est basée sur la modélisation mathématique des processus non stationnaires instables du changement dans le temps des caractéristiques métrologiques des blocs analogiques informatiques des systèmes de mesure et comprend la procédure de l'optimisation paramétrique des facteurs externes de l'environnement. Est montré que l'application de cette méthode permet d'augmenter le taux de la fiabilité métrologique plus de 80 %.

---

**Авторы:** *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», директор института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники; *Третьяков Владимир Владиславович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.