

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА АНАЛОГОВЫХ БЛОКОВ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ***

Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; crems@crems.tstu.ru*

Ключевые слова: аналоговый блок; дестабилизирующий фактор; информационно-измерительная система; коррекция; математическая модель; метод; метрологическая надежность; метрологическая характеристика; метрологический ресурс; образцовый сигнал; окружающая среда; статистическое моделирование; элементная база.

Аннотация: Разработана математическая модель изменения во времени метрологической характеристики аналоговых блоков информационно-измерительных систем с учетом внешних дестабилизирующих факторов, а также обобщенная математическая модель параметров элементной базы, используемая в процедуре статистического моделирования метрологических характеристик исследуемых измерительных средств, позволяющая анализировать уровень их метрологической надежности на разных этапах эксплуатации. Предложен метод повышения метрологического ресурса как основного показателя метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем путем коррекции их выходных сигналов. В основу метода положено математическое моделирование исследуемых аналоговых блоков, при этом предложенный алгоритм коррекции позволяет осуществлять и коррекцию процесса изменения во времени метрологической характеристики с учетом дестабилизирующих факторов, что способствует повышению метрологического ресурса аналоговых блоков информационно-измерительных систем.

Информационно-измерительные системы (ИИС) широко применяются во многих технических областях. Задача обеспечения их высокого уровня метрологической надежности (МН) является крайне актуальной. Основным показателем МН ИИС является метрологический ресурс (МР), оценка которого на этапе проектирования ИИС позволяет контролировать уровень МН ИИС в произвольные моменты времени предстоящей эксплуатации [1].

Метрологическая надежность ИИС определяется, в основном, метрологической надежностью входящих в их состав аналоговых блоков (АБ) [1, 2]. Решение задачи оценки МН при проектировании АБ ИИС формируется с применением

* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах».

метода аналитико-вероятностного прогнозирования [1], основанного на математическом моделировании нестационарных случайных процессов изменения во времени метрологической характеристики (МХ) АБ ИИС. Такие математические модели (ММ) строятся на основе статистического моделирования (СМ) значений МХ по данным об изменении параметров элементной базы (ЭБ) в процессе предстоящей эксплуатации [1]. Воздействие повышенных значений внешних дестабилизирующих факторов (ДФ) окружающей среды (ОС), таких как температура T , влажность F , давление P и радиация E , существенно ускоряют процесс старения ЭБ АБ и способствуют уменьшению МН ИИС.

С учетом указанных ДФ ОС математическая модель МХ АБ, построенная при анализе структурной и электрической схем блока, может быть записана:

$$S = F(x, \bar{\xi}, \bar{\varphi}) = F[x, \bar{\xi}, (t, T, F, P, E)], \quad (1)$$

где x – входной сигнал; $\bar{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ – вектор параметров элементов; t – время эксплуатации, ч.

Построенная таким образом модель вида (1) используется далее в процедуре СМ значений параметров закона распределения исследуемой МХ в различные моменты времени эксплуатации с учетом ДФ [1]. Полученные результаты процедуры СМ используются для построения ММ изменения во времени МХ, которая позволяет определить МР.

Следует подчеркнуть, что определение математического описания процесса старения ЭБ АБ ИИС под действием внешних ДФ ОС является важным условием для оценки влияния внешних ДФ на процесс изменения во времени МХ АБ ИИС. Применение данной информации в априорной модели процесса старения ЭБ АБ ИИС позволяет корректировать оценку МН с учетом реальных условий эксплуатации [1].

На основе исследований процессов изменения во времени параметров ЭБ с учетом воздействия указанных выше ДФ ОС построена обобщенная ММ изменения во времени ЭБ с учетом ДФ, имеющая вид [1]:

$$\begin{aligned} \xi(t, T, F, P, E) = & \xi_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_{\xi}}{\tau} \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \exp \left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \left(\frac{\ln(P - P_0)}{P - P_0} \right)^r \right) \times \\ & \times \exp \left(\frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} NE_n - E_0 \right) t \left(1 + \alpha(T - T_0) \right) \left(1 + \beta(F - F_0) \right), \quad (2) \end{aligned}$$

где α, β – температурный и влажностный коэффициенты параметра элемента; E_a – энергия активации деградиационного процесса, эВ; k – постоянная Больцмана, эВ·К⁻¹; n – степенной показатель; T, T_0 – температура в реальных и нормальных условиях эксплуатации соответственно, °С; F, F_0 – влажность в реальных и нормальных условиях эксплуатации соответственно, %; P, P_0 – давление в реальных и нормальных условиях эксплуатации соответственно, атм; r – степенной показатель; N, M_1, M_2, E_n, E_0 – справочные значения параметров окружающей среды, определяемые на молекулярном уровне; ε_{ξ} – максимальное изменение параметра элемента за время τ ; τ – срок сохраняемости, ч.

Изложенный подход к математическому моделированию ЭБ и МХ применен при исследовании МН преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), входящего в состав измерительного канала ИИС. Метрологической характеристикой данного АБ является основная относительная погрешность δ . Условие сохранения метрологической исправности записывается в виде: $|\delta(t)| \leq |\delta_{\text{доп}}|, \delta_{\text{доп}} = \pm 5\%$.

На основе результатов процедуры СМ изменения во времени основной относительной погрешности блока ПНЧ, в соответствии с выбранной структурой ММ

изменения параметров его ЭБ и с учетом указанных внешних ДФ построена многофакторная ММ изменения во времени исследуемой МХ блока, учитывающая условия эксплуатации. Данная модель имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{-\sigma}(t, T, F, P, E) = 2,1256 \cdot 10^{10} - 1,9295 \cdot 10^6 t - 3,3972 \cdot 10^9 T - 1,6991 \cdot 10^9 F + \\ \quad + 1,0623 \cdot 10^{10} P + 7,5896 \cdot 10^8 E - 6,1898 \cdot 10^3 tT - 3,0949 \cdot 10^3 tF - \\ \quad - 9,6433 \cdot 10^5 tP - 2,5152 \cdot 10^4 tE + 23,7617 \cdot TFPE - 1,2618 \cdot 10^{-8} t^2 + \\ \quad + 4,7813 \cdot 10^7 T^2 + 1,1946 \cdot 10^7 F^2 + 5,3156 \cdot 10^9 P^2 + 1,5483 \cdot 10^5 E^2; \\ m_{\delta}(t, T, F, P, E) = 2,1261 \cdot 10^{10} - 1,929 \cdot 10^6 t - 3,3967 \cdot 10^9 T - 1,6986 \cdot 10^9 F + \\ \quad + 1,0628 \cdot 10^{10} P + 7,5901 \cdot 10^8 E - 6,1893 \cdot 10^3 tT - 3,0944 \cdot 10^3 tF - \\ \quad - 9,6428 \cdot 10^5 tP - 2,5147 \cdot 10^4 tE + 23,7622 \cdot TFPE - 1,2613 \cdot 10^{-8} t^2 + \\ \quad + 4,7818 \cdot 10^7 T^2 + 1,1951 \cdot 10^7 F^2 + 5,3161 \cdot 10^9 P^2 + 1,5488 \cdot 10^5 E^2; \\ \Psi_{+\sigma}(t, T, F, P, E) = 2,1266 \cdot 10^{10} - 1,9285 \cdot 10^6 t - 3,3962 \cdot 10^9 T - 1,6981 \cdot 10^9 F + \\ \quad + 1,0633 \cdot 10^{10} P + 7,5906 \cdot 10^8 E - 6,1888 \cdot 10^3 tT - 3,0939 \cdot 10^3 tF - \\ \quad - 9,6423 \cdot 10^5 tP - 2,5142 \cdot 10^4 tE + 23,7627 \cdot TFPE - 1,2608 \cdot 10^{-8} t^2 + \\ \quad + 4,7823 \cdot 10^7 T^2 + 1,1956 \cdot 10^7 F^2 + 5,3166 \cdot 10^9 P^2 + 1,5493 \cdot 10^5 E^2. \end{array} \right. \quad (3)$$

Математическая модель (3) позволяет получить массив значений МР как основного показателя МН при различных сочетаниях значений ДФ ОС. На рисунке 1 представлена графическая иллюстрация ММ изменения во времени исследуемой МХ для следующих условий эксплуатации: $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $F = 60 \%$; $P = 2 \text{ атм}$ и $E = 70 \text{ мкР/ч}$. Метрологический ресурс при этом составляет: $t_p = 32000 \text{ ч}$.

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет оценивать уровень МН проектируемого АБ ИИС на различных этапах предстоящей эксплуатации и при разных значениях ДФ ОС. Однако, помимо оценки, важной целью исследований является повышение МН ИИС. Разработан метод повышения МН ИИС на стадии эксплуатации, основанный на коррекции значений выходного сигнала АБ ИИС [2]. Повышение МН АБ ИИС в этом случае осуществляется посредством коррекции ММ изменения во времени МХ АБ ИИС.

Суть метода заключается в вычислении погрешности измерения с последующим вычислением соответствующего корректирующего значения выходного сигнала [2]. На вход АБ одновременно подается образцовый $x_{oi}(t_i)$ и измеряемый $x_i(t_i)$ сигналы, соответствующие моменту времени эксплуатации t_i , которые преобразу-

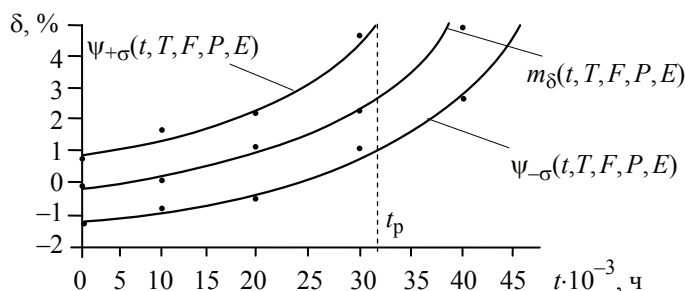


Рис. 1. Графические зависимости изменения во времени МХ ИИС

ются в исследуемом АБ. На выходе АБ фиксируются измеренные значения образцового $y_{oi}(t_i)$ и исследуемого $y_i(t_i)$ сигналов. Вычисляется значение основной относительной погрешности измерения образцового сигнала

$$\delta_{oi}(t_i) = \frac{y_{oi}(t_i) - x_{oi}(t_i)}{x_{oi}(t_i)}, \quad i = 1, \dots, k. \quad (4)$$

где k – число временных сечений, в которых производится измерение.

Вычислив значения $\delta_{oi}(t_i)$ по образцовым сигналам $x_{oi}(t_i)$ в соответствии с (4), справедливо их использовать и для рабочего сигнала $x_i(t_i)$ [2]. То есть принимается, что $\delta_i(t_i) = \delta_{oi}(t_i)$. Тогда несложно вычислить действительное значение измеряемой величины $y_{di}(t_i)$:

$$y_{di}(t_i) = \frac{y_i(t_i)}{\delta_i(t_i) + 1}. \quad (5)$$

Рассчитаем значение основной абсолютной погрешности по формуле

$$\Delta_i(t_i) = y_{di}(t_i) - y_i(t_i).$$

Следующим этапом является выработка соответствующей поправочной величины $z_i(y_i)$. Величина поправки должна быть равна абсолютной погрешности ИИС в заданной точке диапазона измерения с обратным знаком:

$$z_i(y_i) = -\Delta_i(t_i).$$

Проведем процедуру коррекции с вычитанием поправочной величины $z_i(y_i)$ из значения измеренной величины $y_i(t_i)$, в результате чего на выходе получим скорректированное значение

$$y_{ci}(t_i) = y_i(t_i) - z_i(y_i).$$

Величина $y_{ci}(t_i)$ подается на устройства вывода информации. Структура подсистемы коррекции значения измеренного сигнала представлена на рис. 2.

Важным преимуществом использования описанного метода коррекции погрешности выходного сигнала АБ ИИС является возможность коррекции также многофакторной ММ (3) изменения во времени МХ АБ ИИС с учетом условий эксплуатации.

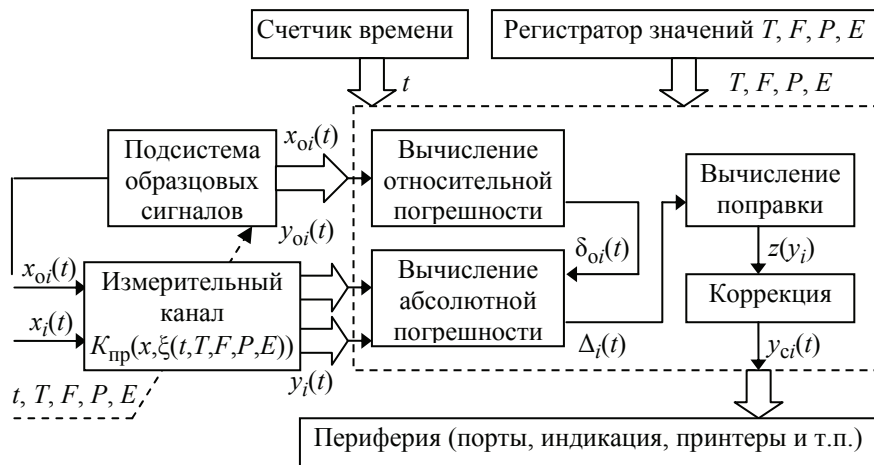


Рис. 2. Структура подсистемы коррекции выходного сигнала

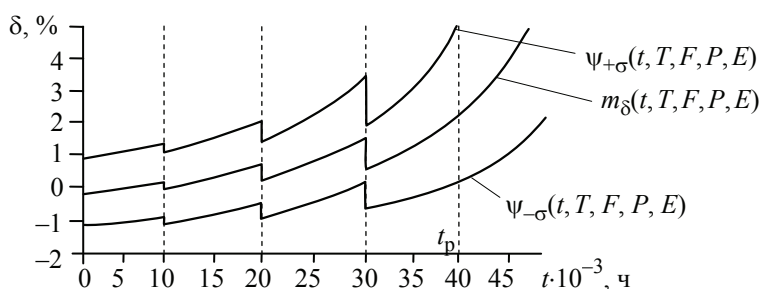


Рис. 3. Графические зависимости изменения во времени МХ ИИС в результате проведения процедуры коррекции

Результат функционирования описанного алгоритма представлен в виде графических интерпретаций процесса изменения во времени МХ АБ ИИС, приведенных на рис. 3. Данный подход применен к рассмотренному выше ПНЧ. Как видно из рис. 3, МР увеличился с 32000 до 40000 ч, что соответствует увеличению МН на 22 % при фиксированных значениях параметров ОС ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; $F = 60\%$; $P = 2\text{ атм}$ и $E = 70\text{ мкР/ч}$).

Таким образом, применение адекватных ММ, описывающих процессы изменения во времени МХ АБ и составляющей эти блоки ЭБ, дает возможность решить задачи оценки МН ИИС при проектировании и ее повышения на этапе эксплуатации.

Список литературы

1. 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.
2. Чернышова, Т. И. Метод повышения метрологического ресурса аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 242 – 249.

Application of Mathematical Modeling for Evaluation Methods and Improvement of Metrological Resource of Analog Units of Data-Measuring Systems

T. I. Chernyshova, V. V. Tretyakov

*Department "Designing of Electronic and Microprocessor Systems", TSTU;
crems@crems.jesby.tstu.ru*

Keywords: analog unit; correction; destabilizing factor; element base; environment; etalon signal; data-measuring system; mathematical model; method; metrological characteristic; metrological reliability; metrological resource; statistic modeling.

Abstract: The authors explore analog units of data-measuring systems from the perspective of metrological reliability. A mathematical model of behavior in time of metrological characteristics of analog units of information-measuring systems given the

external destabilizing factors was developed; a generalized mathematical model of the element base parameters used in the process of statistical modeling of the metrological characteristics of the investigated measuring instruments was developed; the latter permits the analysis of the level of metrological reliability at different stages of operation.

We propose a new method of improvement of metrological resource as a main indicator of metrological reliability of analog units of data-measuring systems. It permits the correction of the output signals. The method is based on modeling of the analog units; the proposed correction algorithm also allows for the correction of behavior in time of metrological characteristics considering destabilizing factors, thus contributing to the improvement of metrological resources of analog units of data-measuring systems.

The first part of the article gives a mathematical description of the developed algorithm and its working mechanism, which are illustrated by structure schemas and graphs. The second part illustrates the practical implementation of the developed method. The experiment was conducted and described. The output data showed an increase in the metrological resource of the analog units.

References

1. Chernyshova T.I., Tret'jakov V.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 42-47.

2. Chernyshova T.I., Tret'jakov V.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 242-249.

Anwendung der mathematischen Modellierung bei der Realisierung der Methoden der Einschätzung und der Erhöhung der metrologischen Ressource der Analogblöcke der Informationsmesssysteme

Zusammenfassung: Es ist das mathematische Modell der Veränderung in der Zeit der metrologischen Charakteristiken der Analogblöcke der Informationsmesssysteme unter Berücksichtigung der äußerlichen destabilisierenden Faktoren, sowie das verallgemeinerte mathematische Modell der Parameter der Elementbasis erarbeitet, die in der Prozedur der statistischen Modellierung der metrologischen Charakteristiken der untersuchten Messmittel angewandt wird und die Niveau ihrer metrologischen Zuverlässigkeit in verschiedenen Etappen des Betriebes zu analysieren erlaubt. Es ist die Methode der Erhöhung der metrologischen Ressource, wie der Hauptkennziffer der metrologischen Zuverlässigkeit der Analogblöcke der Informationsmesssysteme mittels der Korrektur ihrer Abgabesignale angeboten. In die Grundlage der Methode ist die mathematische Modellierung der untersuchten Analogblöcke angebracht, dabei lässt der angebotene Algorithmus der Korrektur auch zu, die Korrektur des Prozesses der Veränderung in der Zeit der metrologischen Charakteristiken unter Berücksichtigung der destabilisierenden Faktoren zu verwirklichen, was zur Erhöhung der metrologischen Ressource der Analogblöcke der Informationsmesssysteme beiträgt.

Application de la modélisation mathématique lors de la mise en œuvre des méthodes de l'évaluation et de l'augmentation de la ressource métrologique des blocs analogiques des systèmes d'information et de mesure

Résumé: Est élaboré le modèle mathématique de la variation dans le temps de la caractéristique métrologique des blocs analogiques des systèmes d'information et de mesure compte tenu des facteurs extérieurs de déstabilisation ainsi que le modèle

mathématique généralisé des paramètres de la base élémentaire utilisée dans la procédure de modélisation statistique des caractéristiques métrologiques étudiées permettant d'analyser le niveau de leur fiabilité métrologique sur de différents stades de l'exploitation. Est proposée la méthode d'augmentation de la ressource métrologique comme principal indicateur de la fiabilité métrologique des blocs analogiques des systèmes d'information et de mesure grâce à la correction de leurs signaux de sortie. La méthode est fondée sur la modélisation mathématique des blocs analogiques étudiés; l'algorithme de correction proposé permet également de corriger les processus du changement dans le temps des caractéristiques métrologiques tenant compte des facteurs de déstabilisation, ce qui contribue à augmenter la ressource métrologique des blocs analogiques des systèmes d'information et de mesure.

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 ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
