

ОЦЕНКА И ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Т.И. Чернышова, М.И. Нистратов

*«Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»; miha_tmb@mail.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: метрологическая надежность; средство измерения; условия эксплуатации.

Аннотация: Проведен анализ влияния параметров окружающей среды на показатели метрологической надежности. Рассмотрен метод повышения метрологической надежности средств измерений на основе данных о влиянии параметров окружающей среды на скорость старения элементной базы.

Разработка методов оценки и повышения метрологической надежности (МН) измерительных средств (ИС) с учетом воздействия внешних влияющих факторов является задачей, решение которой позволит потребителю более точно определить метрологическую надежность на любой момент времени эксплуатации в реальных условиях, правильно выбрать сроки проверок и профилактических работ и увеличить метрологический ресурс как основной показатель МН.

Как известно, основным источником метрологических отказов является измерительный канал ИС, а именно, блоки в его составе, осуществляющие обработку сигнала в аналоговой форме – аналоговые блоки. При этом изменение во времени метрологических характеристик (МХ) таких блоков обусловлено временным дрейфом параметров комплектующих элементов.

Разработан метод повышения метрологического ресурса, учитывающий влажность и температуру окружающей среды. На рис. 1 показана блок-схема метода повышения метрологического ресурса, позволяющего производить оценку выбранного показателя МН в различных условиях эксплуатации ИС на основе имеющихся априорных знаний о старении элементной базы. Основу метода составляет регулировка параметров элементов. При приближении МХ к метрологическому отказу определяются ее значения по математической модели проектируемого ИС с использованием метода аналитико-вероятностного прогнозирования [1].

Для прогнозирования значений МХ проектируемого аналогового блока в заданный момент времени t при определенных условиях эксплуатации (температуре T и влажности F окружающей среды) составляется математическая модель функционирования блока (см. рис. 1)

$$S(t) = f(x, \bar{\xi}(F, T, t)), \quad (1)$$

где S – исследуемая МХ; x – входной сигнал; $\bar{\xi}$ – вектор параметров комплектующих элементов.



Рис. 1. Блок-схема метода повышения метрологического ресурса

Математическая модель изменения во времени параметров элементов с учетом влажности и температуры эксплуатации имеет следующий вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} \xi(F, T, t) &= \xi_0(1 + v_0 A_F t)(1 + \alpha(T - T_0))(1 + \beta(F - F_0)) = \\ &= \xi_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_\xi}{\tau} \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) t \right) (1 + \alpha(T - T_0))(1 + \beta(F - F_0)), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\xi(F, T, t)$ – изменение во времени параметра элемента, учитывающее влияние температуры и влажности окружающей среды; α – температурный коэффициент параметра элемента, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; β – влажностный коэффициент параметра элемента; E_a – энергия активации деградационного процесса, эВ; k – постоянная Больцмана, эВ/К; n – степенной показатель; T , F – температура и влажность в условиях эксплуатации соответственно; T_0 – температура нормальных условий эксплуатации, К; F_0 – относительная влажность нормальных условий, %; τ – срок сохранности при нормальных условиях, ч; ε_ξ – максимальное значение относительного изменения номинала при нормальных условиях за время τ ; v_0 – скорость старения при нормальных условиях, ч^{-1} ; A_F – ускоряющий фактор.

Далее производится статистическое моделирование МХ в различных временных сечениях. Используя в процедуре статистического моделирования математические модели вида (2), возможно оценить метрологическую надежность исследуемых ИС с учетом условий эксплуатации. С помощью методов интерполяции по полученным в области контроля значениям МХ исследуемого аналогового блока строится математическая модель процессов изменения во времени МХ. Модель представляет собой совокупность аналитических зависимостей, полученных для функций изменения во времени математического ожидания исследуемой МХ $m_S(t)$ и функций, характеризующих изменение во времени границ отклонения возможных значений МХ от ее математического ожидания $\psi_{\pm\sigma}(t) = m_S \pm c\sigma_S(t)$, где c – коэффициент, выбранный в зависимости от уровня доверительной вероятности [3].

Экстраполяция зависимостей $m_S(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$ на область предстоящей эксплуатации позволяет дать оценку времени наступления метрологического отказа или величины метрологического ресурса t_p . Моделирование при варьируемых параметрах влажности и температуры окружающей среды позволяет получить базу данных о темпах изменения МХ при различных внешних условиях, выработать рекомендации по эксплуатации исследуемого ИС в жестких условиях работы, а также определить значения межповерочных интервалов при предстоящей эксплуатации ИС.

Для решения задачи повышения МН в математической модели блока выделяются элементы, увеличение или уменьшение во времени параметров которых вызывает наибольшее изменение значений метрологической характеристики. При этом для каждого элемента производится расчет нормируемой частной производной вида

$$G(\xi_j) = \frac{\overline{G}(\xi_j)\sigma_{\xi_j}}{\sqrt{\sum_j \overline{G}^2(\xi_j)\sigma^2}}, \quad j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $\overline{G}(\xi_j) = \left| \partial S / \partial \xi_j \right|$ – значения частных производных, вычисленных по номинальным значениям параметров j -го комплектующего элемента блока; ξ_j – пара-

метры комплектующих элементов блока; σ_{ξ_j} – среднее квадратичное отклонение параметра j -го комплектующего элемента блока.

Затем осуществляется ранжирование элементов по абсолютному значению $G(\xi_j)$. Выделяются элементы, имеющие максимальное значение нормируемой частной производной $G(\xi_j)$. При приближении исследуемой МХ к предельно допустимому значению производится замена выделенных элементов. Необходимость изменения параметров элементов выбирают из условия приближения МХ к своему допустимому значению согласно выражению

$$|S_{\text{доп}} - S(t_i, T, F)| \leq 0,1S_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где $S_{\text{доп}}$ – допустимое значение нормируемой МХ.

Определяются новые значения параметров элементов математической модели функционирования блока для зарегистрированных в момент поверки условий эксплуатации T и F .

Полученные новые значения параметров элементов используются для расчета изменения во времени исследуемой МХ и определения нового значения метрологического ресурса.

Рассмотрим пример оценки и повышения метрологической надежности блока нормирующего преобразователя, представляющего собой усилитель постоянного тока с преобразователем напряжение-частота (ПНЧ), входящего в измерительный канал средств теплофизических измерений, электрическая принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

Нормируемой метрологической характеристикой блока является основная относительная погрешность δ . Математическая модель исследуемой метрологической характеристики преобразователя имеет вид:

$$\begin{cases} \delta = \frac{f_p - f_n}{f_n} 100 \%; \\ f(U_{\text{вх}}) = \frac{U_{\text{вх}} \left(\frac{R3 + R4}{R1} + \frac{R3 \cdot R4}{R1 \cdot R5} \right) \left(1 + \frac{R9}{R8} \right)}{7,5 \cdot R10 \cdot C1}, \end{cases} \quad (5)$$

где f_p – расчетная частота на выходе блока; f_n – номинальная частота на выходе блока (в данном случае при $U_{\text{вх}} = 5$ мВ, $f_n = 3,373 \cdot 10^4$ Гц); $C1, R1, R3, R4, R5, R8, R9, R10$ – параметры элементов.

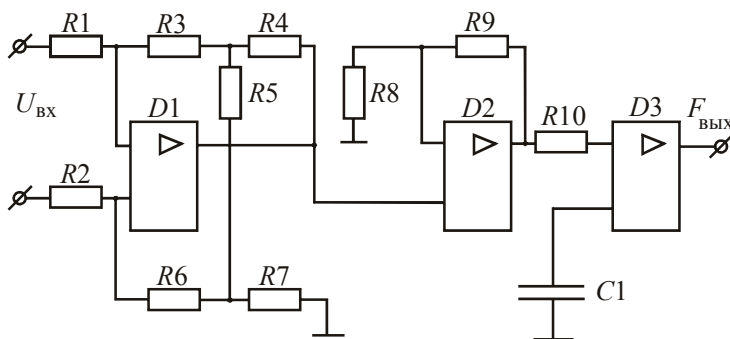


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема ПНЧ

Условие сохранения метрологической исправности имеет вид $\delta(t) \leq \delta_{\text{доп}}$, где $\delta_{\text{доп}} = \pm 5\%$.

По величине нормируемой частной производной $G(\xi_j)$ вида (3) выделяются элементы, оказывающие наибольшее влияние на значение метрологической характеристики блока. Расчеты значений $G(\xi_j)$ показаны в табл. 1.

Наибольшее влияние на МХ оказывает R10, для него величина значения критерия по выражению (3) составляет $G(R10) = 0,378$. В качестве регулируемого элемента используется переменный резистор, а именно проволочный многооборотный подстроечный резистор типа СП5-3.

Далее по математической модели функционирования блока производится статистическое моделирование изменения во времени МХ ИС с учетом изменяемых внешних факторов (температура, влажность). По полученным данным моделирования составляется база данных изменения во времени МХ ИС в различных условиях эксплуатации.

Статистическое моделирование проводилось при помощи программного обеспечения, созданного согласно вышеизложенной методике, при следующих условиях эксплуатации: $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 50\%$; $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 70\%$.

По результатам статистического моделирования получены математические модели изменения во времени МХ для различных условий эксплуатации (рис. 3).

Таблица 1

Значения нормируемой частной производной

Элемент	R1	R3	R4	R5	R8	R9	R10	C1
Значение $ G(\xi_j) $	0,176	0,176	0,101	0,079	0,204	0,204	0,378	0,312

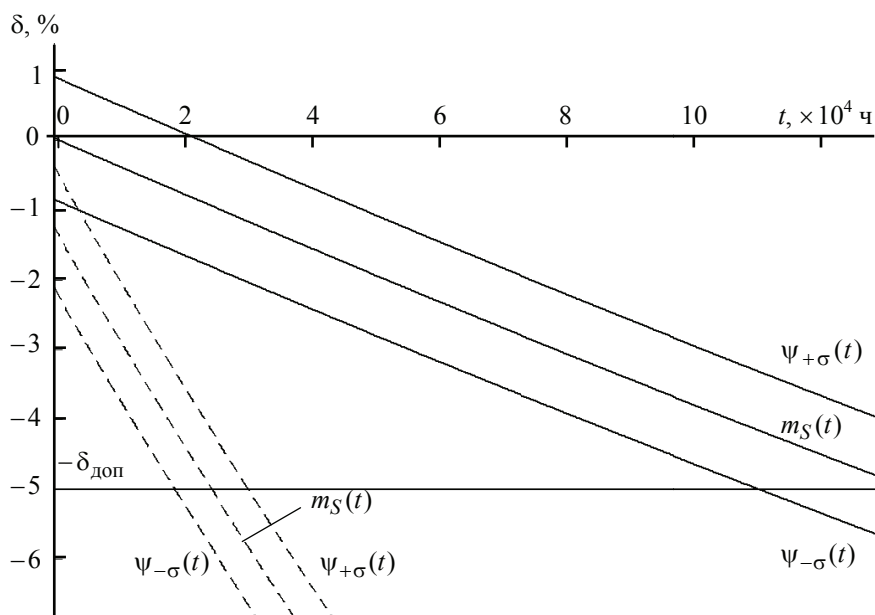


Рис. 3. Модели изменения во времени МХ:

— — $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 50\%$;
 - - - - $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $F = 70\%$

В частности, для нормальных условий математическая модель в аналитической форме имеет вид:

$$\begin{aligned}\psi_{-\sigma}(t) &= 1,898 \cdot 10^{-11} t^2 - 3,956 \cdot 10^{-5} t - 0,869; \\ m_S(t) &= 1,94 \cdot 10^{-11} t^2 - 3,995 \cdot 10^{-5} t - 0,013; \\ \psi_{+\sigma}(t) &= 1,987 \cdot 10^{-11} t^2 - 4,033 \cdot 10^{-5} t + 0,895.\end{aligned}\quad (6)$$

Для эксплуатации при повышенной температуре и влажности окружающей среды ($T = 50^\circ\text{C}$, $F = 70\%$) математическая модель имеет вид:

$$\begin{aligned}\psi_{-\sigma}(t) &= 2,901 \cdot 10^{-10} t^2 - 1,574 \cdot 10^{-4} t - 2,214; \\ m_S(t) &= 2,927 \cdot 10^{-10} t^2 - 1,588 \cdot 10^{-5} t - 1,345; \\ \psi_{+\sigma}(t) &= 2,953 \cdot 10^{-10} t^2 + 1,602 \cdot 10^{-4} t - 0,476.\end{aligned}\quad (7)$$

При этом с доверительной вероятностью 0,9973 метрологический ресурс составляет 17500 ч. Межповерочный интервал для данного блока составляет 5000 ч.

Проведение контроля МХ блока в указанных реальных условиях показало, что в момент времени поверки $t_3 = 15000$ ч условие (4) не выполняется. Требуется скорректировать параметры регулируемого элемента таким образом, чтобы $|S(t) - S(t, T, F)| \rightarrow 0$.

Глубина коррекции частоты на выходе преобразователя определяется как разность частоты, полученной в результате поверки и частоты, полученной по

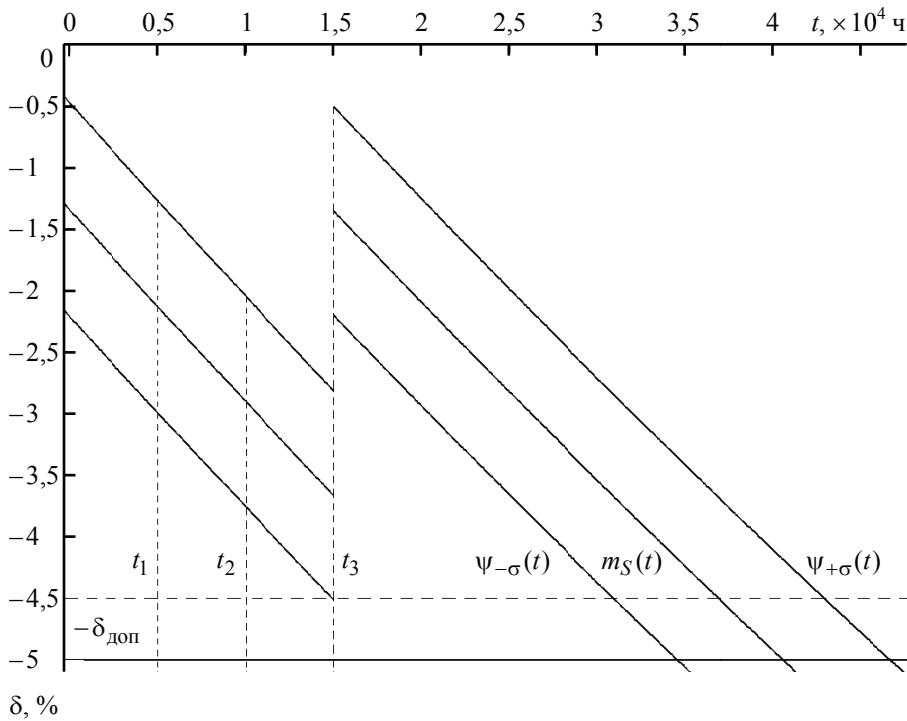


Рис. 4. Корректировка значения МХ в момент времени $t_3 = 15000$ ч ($T = 50^\circ\text{C}$, $F = 70\%$)

математической модели для нормальных условий эксплуатации в данном временном сечении и составляет

$$\Delta f = f_p(t) - f_p(t, T, F) = 67325 - 66650 = 675 \text{ Гц}, \quad (8)$$

где $f_p(t)$ – частота на выходе блока в данном временном сечении согласно математической модели изменения МХ для нормальных условий; $f_p(t, T, F)$ – частота на выходе блока, полученная в результате поверки.

Величина изменения параметра регулируемого элемента $R10$ определяется по найденной глубине коррекции информативного параметра (выходной частоты). Подставляя математическую модель блока (5) в (8), получаем

$$\Delta f(U_{\text{вх}}) = U_{\text{вх}}(K(t, T, F) - K_{\text{н}}(t, T, F)), \quad (9)$$

где $K_{\text{н}}$ – новое значение коэффициента преобразования блока. Новое значение регулируемого резистора согласно (9) составляет $R10_{\text{н}} = 41000 \text{ Ом}$.

Используя найденное значение регулируемого элемента в статистическом моделировании, вычисляется новое значение метрологического ресурса. Метрологический ресурс ПНЧ при этом составляет 34500 ч с доверительной вероятностью 0,9973 (рис. 4).

Таким образом, использование априорных знаний о старении элементной базы, а также о влиянии параметров окружающей среды на характеристики элементов позволяет более достоверно оценивать параметры МН. Своевременная замена наиболее влияющих на МХ компонентов позволяет увеличить величину метрологического ресурса измерительных средств при их работе в жестких условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Чернышова, Т.И. Прогнозирование метрологической надежности электронных измерительных средств с учетом влажности / Т.И. Чернышова, М.И. Нистратов // Проектирование и технология электрон. средств. – 2007. – № 1. – С. 68–72.
2. Peck, D. Stewart. Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation / D. Stewart Peck // 24th Annual Proceedings of the International Reliability Physics Symposium, IEEE. – 1986. – P. 44–50.
3. Мищенко, С.В. Метрологическая надежность измерительных средств / С.В. Мищенко, Э.И. Цветков, Т.И. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2001. – 218 с.

Evaluation and Improvement of Metrological Reliability of Measuring Devices in Actual Use Environment

T.I. Chernyshova, M.I. Nistratov

*Department “Design of Radioelectronic Aids and Microprocessor Systems”, TSTU;
miha_tmb@mail.ru*

Key words and phrases: measuring device; metrological reliability; service conditions.

Abstract: The paper analyzes the influence of environmental parameters on metrological reliability indexes. It considers the technique of improving metrological reliability of measuring devices on the basis of data on the effect of environmental parameters on the element base aging velocity.

Einschätzung und Erhöhung der metrologischen Sicherheit der Meßmittel in den realen Nutzungsbedingungen

Zusammenfassung: In dem Artikel ist die Analyse der Einwirkung der Umweltparameter auf die Daten der metrologischen Sicherheit durchgeführt. Es ist die Methode der Erhöhung der metrologischen Sicherheit der Meßmittel auf Grund der Angaben über die Einwirkung der Umweltparameter auf die Geschwindigkeit der Alterung der Elementengrundlage betrachtet.

Appréciation et augmentation de la sécurité métrologique des moyens de mesure dans les conditions réelles de l'exploitation

Résumé: Dans l'article est fait l'analyse de l'influence des paramètres du milieu de l'environnement sur les indices de la sécurité métrologique. Est envisagée la méthode de l'augmentation de la sécurité métrologique des moyens de mesure à la base des données sur l'influence des paramètres du milieu de l'environnement sur la vitesse du vieillissement de la base élémentaire.

Авторы: *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», декан энергетического факультета; *Нистратов Михаил Игоревич* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, ГОУ ВПО «ТГТУ».
