

## ОЦЕНКА И ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Т.И. Чернышова, М.И. Нистратов

*Кафедра «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 МН на любой момент времени эксплуатации в реальных условиях, правильно выбрать сроки проверок и профилактических работ и увеличить метрологический ресурс как основной показатель МН.

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, причем старение элементной базы ускоряется с увеличением температуры и влажности окружающей среды при эксплуатации ИС.

Для оценки метрологического ресурса используется метод, включающий следующие этапы. 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 метрологической характеристики

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

где  $S(t, T, F)$  – исследуемая метрологическая характеристика;  $x$  – входной сигнал;  $\bar{\xi}$  – вектор параметров комплектующих элементов.

Далее определяется математическая модель изменения во времени параметров элементов с учетом влажности и температуры эксплуатации в виде [1, 2]:

$$\begin{aligned} \xi(t, T, F) &= \xi_0(1 + \nu_0 A_F t)(1 + \alpha(T - T_0))(1 + \beta(F - F_0)) = \\ &= \xi_0 \left( 1 + \frac{\varepsilon_\xi}{\tau} \left( \frac{F}{F_0} \right)^n \exp \left( \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) t \right) (1 + \alpha(T - T_0))(1 + \beta(F - F_0)), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\xi(t, T, F)$  – изменение во времени параметра элемента, учитывающее влияние температуры и влажности окружающей среды;  $\alpha$  – температурный коэффициент элемента;  $\beta$  – влажностный коэффициент элемента;  $\tau$  – срок сохраняемости элемента при нормальных условиях;  $\varepsilon_{\xi}$  – максимальное значение относительного изменения номинала при нормальных условиях за время  $\tau$ ;  $E_a$  – энергия активации деградационного процесса, эВ;  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 8,617385 \cdot 10^{-5}$  эВ · К<sup>-1</sup>;  $n$  – степенной показатель;  $v_0$  – скорость старения при нормальных условиях;  $T_0$  – температура нормальных условий эксплуатации,  $T_0 = 293$  К;  $F_0 = 50$  % – относительная влажность нормальных условий.

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

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

В тех случаях, когда определяемое значение  $t_p$  не соответствует требованиям к уровню МН проектируемого ИС, принимаются меры по его повышению. Разработан метод повышения метрологического ресурса, который заключается в коррекции измеренного значения выходного сигнала аналогового блока посредством встроенной в ИС математической модели, реализуемой оператором  $H(t, T, F)$ , для компенсации изменения во времени параметров элементной базы. Достоинство такого подхода состоит в его научно обоснованном математическом аппарате, а также в широком современном использовании методов цифровой обработки сигналов в электронных ИС.

Общее представление о принципе коррекции измерительной информации иллюстрируется схемой на рис. 1. На схеме показаны измерительный канал (ИК), МХ

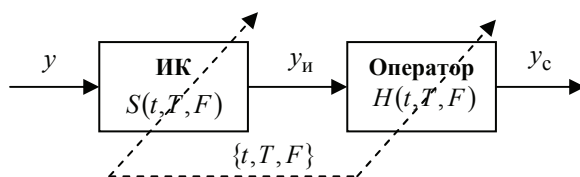


Рис. 1. Обобщенная схема компенсации дрейфа параметров МХ

которого определяется моделью  $S(t, T, F)$ , зависящий от времени  $t$  в условиях эксплуатации  $\{T, F\}$  и оператор коррективки МХ  $H(t, T, F)$ , производящий обработку измерительной информации с целью компенсации временного дрейфа параметров элементной базы и внешних влияющих факторов. Оператор  $H(t, T, F)$  предлагается реализовать алгоритмически, то есть путем программирования и последующего вычисления некоторого уравнения или системы уравнений  $H(t, T, F)$ .

Вследствие процессов старения, протекающих в элементной базе ИС, модель изменения во времени МХ ИС  $S(t, T, F)$  имеет ярко выраженный тренд, и прогнозируемое время метрологического отказа или величина метрологического ресурса  $t_p$  при заданных параметрах внешних факторов  $\bar{\varphi} = \{T, F\}$  наступает в результате пересечения одной из функций  $\psi_{\pm\sigma}(t, T, F)$  границ предельно допустимого значения МХ, а именно  $\pm S_{\text{доп}}$ .

Метод повышения МН ИС алгоритмическим способом состоит в том, чтобы исключать оператором  $H(t, T, F)$  трендовую составляющую МХ из результатов измерения выходной величины аналогового блока  $y_{\text{и}}$ . Изменение во времени МХ представляет собой нестационарный случайный процесс с монотонно изменяющимся математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением. Вследствие этого границы прогноза значений МХ  $[\psi_{-\sigma}(t, T, F); \psi_{+\sigma}(t, T, F)]$  с течением времени расширяются. В некоторый момент времени  $t_{p, \text{корр}}$  данный интервал достигает ширины, равной величине интервала  $[-S_{\text{доп}}; +S_{\text{доп}}]$ . В рамках предлагаемого метода повышения МН ставится задача исключения трендовой составляющей исследуемой МХ разрабатываемого ИС таким образом, чтобы с заданной доверительной вероятностью границы прогнозируемых значений МХ  $\psi_{\pm\sigma}(t, T, F)$  пересекали предельно допустимые значения МХ  $\pm S_{\text{доп}}$  одновременно в момент времени  $t_{p, \text{корр}}$ , то есть выполнялось условие

$$\begin{cases} \psi_{-\sigma}(t_{p, \text{корр}}, T, F) = -S_{\text{доп}}; \\ \psi_{+\sigma}(t_{p, \text{корр}}, T, F) = +S_{\text{доп}}. \end{cases}$$

Вследствие исключения трендовой составляющей МХ величина  $t_{p, \text{корр}}$  с заданной доверительной вероятностью определяет повышенное значение метрологического ресурса для каждого из значений вектора внешних влияющих факторов  $\{T, F\}$ .

Для достижения поставленной задачи повышения МН требуется составить математическую модель оператора  $H(t, T, F)$ . Без потери общности для синтеза алгоритма повышения МН моделирование оператора  $H(t, T, F)$  производится с помощью аддитивной составляющей (рис. 2), то есть  $y_{\text{с}} = y_{\text{и}} + H(t, T, F)$ . В этом случае зависимость, определяющую поправочное значение  $\Delta y = H(t, T, F)$  измеренного значения, снятого с аналогового блока измерительного канала, можно записать в виде

$$\Delta y = y_{\text{с}} - y_{\text{и}}, \quad (3)$$

где  $y_{\text{и}}$  – значение измеряемой величины на выходе аналогового блока;  $y_{\text{с}}$  – скорректированное значение измеряемой величины. Для решения поставленной

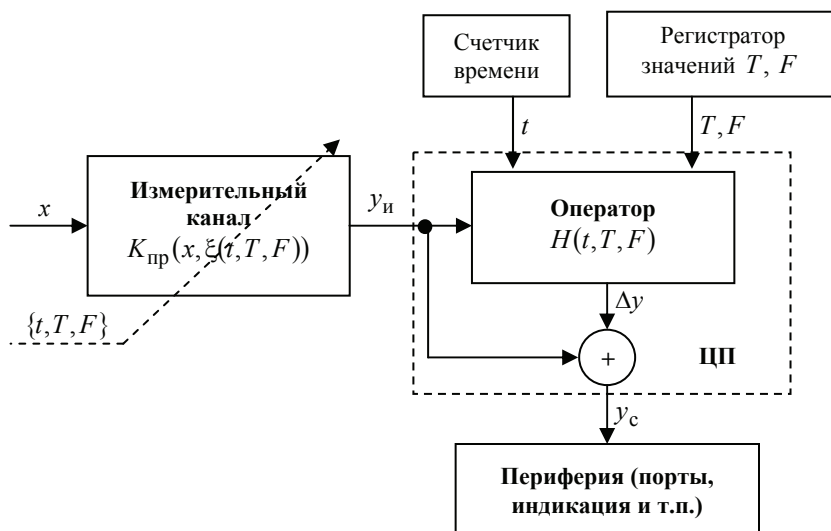


Рис. 2. Структура ИС, реализующая метод повышения метрологической надежности

задачи требуется, чтобы скорректированное значение  $y_c$  имело настолько низкую погрешность, что могло бы заменить действительное значение  $y_d$  измеряемой величины. Исходя из этого, выражение (3) может быть переписано в виде

$$\Delta y = y_d - y_{и}, \quad (4)$$

где  $y_d$  – действительное значение измеряемой величины.

В качестве исследуемой МХ, как правило, выбирается основная относительная погрешность, записываемая в виде

$$\delta = \frac{y_{и} - y_d}{y_d}. \quad (5)$$

Значения основной относительной погрешности в различные моменты времени эксплуатации могут быть рассчитаны по многофакторной математической модели изменения во времени МХ  $\delta(t, T, F)$ . Принимая допущение о симметричности закона распределения значений МХ, и следовательно, границ прогнозируемого значения МХ  $\psi_{\pm\sigma}(t, T, F)$  относительно математического ожидания  $m_{\delta}(t, T, F)$  согласно математической модели вида (1), выражение (5) можно переписать в виде

$$m_{\delta}(t, T, F) = \frac{y_{и} - y_d}{y_d}, \quad (6)$$

откуда

$$y_d = \frac{y_{и}}{m_{\delta}(t, T, F) + 1}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), получим окончательный вид зависимости, определяющей поправочное значение измеряемой величины и собственно модель оператора корректировки

$$\Delta y = \frac{y_{и}}{m_{\delta}(t, T, F) + 1} - y_{и} = -\frac{y_{и} m_{\delta}(t, T, F)}{m_{\delta}(t, T, F) + 1}. \quad (8)$$

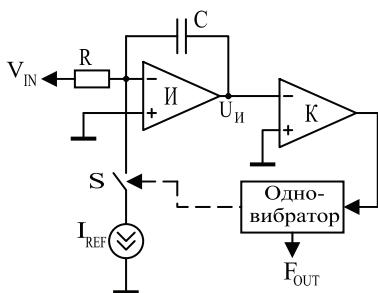


Рис. 3. Структурная схема ПНЧ

$K_{пр}$  измерительного канала изменяется с течением времени, то есть время  $t$  является внешним относительно ИС фактором, определяющим значение основной относительной погрешности измерительного канала. Кроме того, внешние влияющие факторы  $T$  и  $F$  дополнительно воздействуют на характеристики канала. Для каждого момента времени предстоящей эксплуатации  $t$ , отсчет которого производится счетчиком времени, встроенным в ИС, с учетом зарегистрированных значений внешних влияющих факторов  $\{T, F\}$  и выходной величины измерительного канала  $u_{и}$  цифровым процессором (ЦП), входящим в состав процессорного блока ИС, согласно оператору  $H(t, T, F)$  определяется поправочное значение  $\Delta u$ . При этом регистрация значений  $\{T, F\}$  может быть реализована при помощи иных ИС, входящих в состав измерительного комплекса, а также встроенных датчиков температуры и влажности окружающей среды.

Рассмотрим пример оценки и повышения метрологической надежности блока нормирующего преобразователя, представляющего преобразователь напряжение-частота (ПНЧ), входящего в измерительный канал средств теплофизических измерений. Структурная схема этого блока представлена на рис. 3.

Нормируемой МХ блока является основная относительная погрешность  $\delta$ . Условие сохранения метрологической исправности имеет вид  $\delta(t) \leq \delta_{доп}$ , где  $\delta_{доп} = \pm 5\%$ . Математическая модель исследуемой метрологической характеристики преобразователя имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta = \frac{K_{пр}(t, T, F) - K_{пр.н}}{K_{пр.н}}; \\ K_{пр}(t, T, F) = \frac{1}{R_1 \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{БЭ}} \frac{1}{C_3 R_3 \ln \left[ \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left( 1 + \frac{U_{VD1}}{U_{OY \max}} \right) \right]}, \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $K_{пр}(t, T, F)$  – временной дрейф коэффициента преобразования ПНЧ;  $K_{пр.н}$  – номинальный коэффициент преобразования;  $C_3, R_1, R_3, \dots, R_8$  – параметры комплектующих элементов.

Далее по математической модели МХ блока (9) производится статистическое моделирование изменения во времени МХ ИС с учетом изменяемых внешних факторов. По полученным данным проведенного статистического моделирования составляется многофакторная математическая модель изменения во времени основной относительной погрешности, которая имеет вид

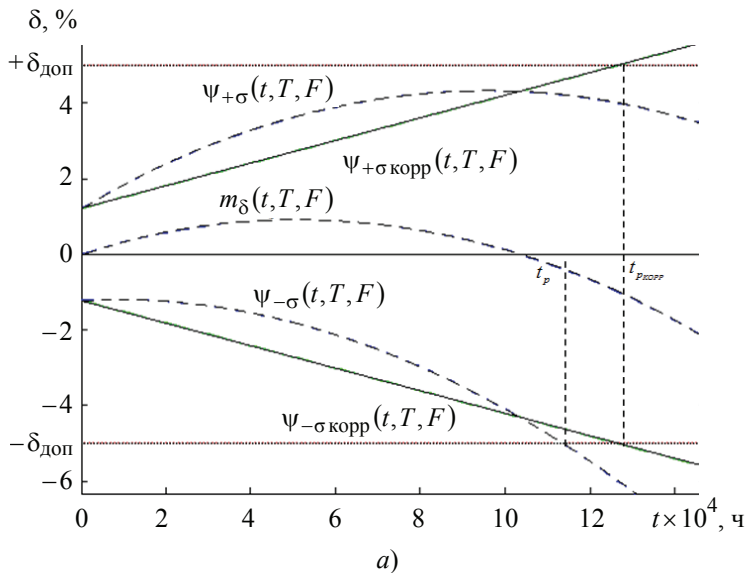
Структура ИС, приведенная на рис. 2, позволяет реализовать метод повышения МН способом внесения поправочных значений в результат измерения.

Здесь входное воздействие  $x$  является измеряемой величиной, поступающей на измерительный канал. На выходе измерительного канала регистрируется величина  $u_{и}$ , значение которой определяется коэффициентом преобразования  $K_{пр}$ . Коэффициент преобразования

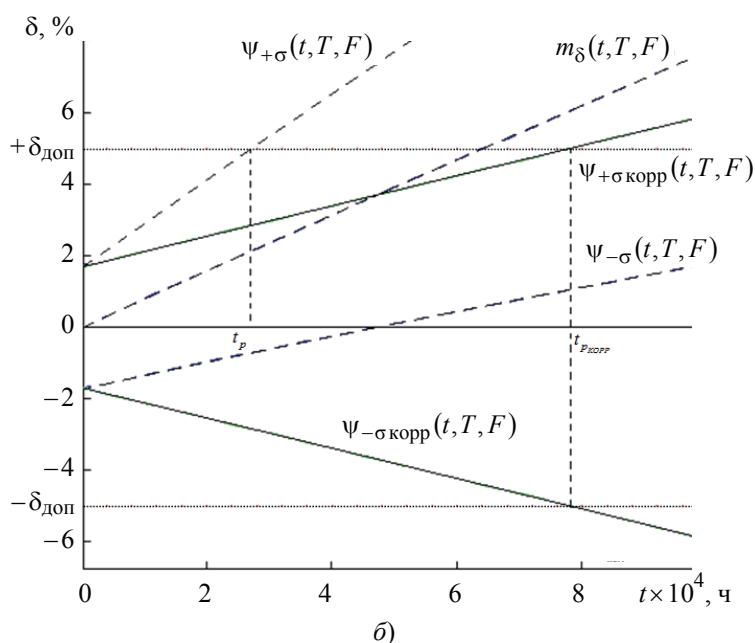
$$\begin{cases}
 \Psi_{-\sigma}(t, T, F) = 129,93 - 1,751 \cdot 10^{-3}t - 0,777T - 0,661F + 5,423 \cdot 10^{-6}tT + \\
 + 3,967 \cdot 10^{-6}tF + 2,069 \cdot 10^{-3}TF - 3,737 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,15 \cdot 10^{-3}T^2 + 1,153 \cdot 10^{-4}F^2; \\
 m_{\delta}(t, T, F) = 129,9303 - 1,75 \cdot 10^{-3}t - 0,768T - 0,649F + 5,424 \cdot 10^{-6}tT + \\
 + 3,968 \cdot 10^{-6}tF + 2,07 \cdot 10^{-3}TF - 3,736 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,13 \cdot 10^{-3}T^2 + 1,1601 \cdot 10^{-4}F^2; \\
 \Psi_{+\sigma}(t, T, F) = 129,9306 - 1,749 \cdot 10^{-3}t - 0,766T - 0,636F + 5,425 \cdot 10^{-6}tT + \\
 + 3,969 \cdot 10^{-6}tF + 2,071 \cdot 10^{-3}TF - 3,735 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,1 \cdot 10^{-3}T^2 + 1,1669 \cdot 10^{-4}F^2.
 \end{cases}
 \quad (10)$$

По математической модели (10) возможно оценить параметры метрологической надежности в различных условиях эксплуатации  $\{T, F\}$ . Результаты моделирования для нормальных условий эксплуатации и для  $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 70 \%$  проиллюстрированы на рис. 4, а, б соответственно. Значения метрологического ресурса с доверительной вероятностью  $P = 0,997$  составляют  $t_{p1} = 115000$  ч и  $t_{p2} = 28000$  ч соответственно. Для повышения метрологического ресурса в процесс обработки измерительной информации вносится оператор корректировки для компенсации внешних влияющих факторов и временного дрейфа элементной базы согласно выражению (8).

Скорректированные модели изменения во времени МХ  $m_{\delta\text{корр}}$ ,  $\Psi_{\pm\sigma\text{корр}}$  также представлены на рис. 4, а, б. Скорректированные значения метрологического ресурса для нормальных условий и для  $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 70 \%$  составляют  $t_{p.\text{корр}1} = 127000$  ч,  $t_{p.\text{корр}2} = 78000$  ч соответственно.



**Рис. 4. Исходная и скорректированная модели изменения во времени МХ ИС (начало):**  
 а – для нормальных условий эксплуатации



**Рис. 4. Продолжение:**  
 $\delta$  – для  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $F = 70\text{ }\%$

Анализ полученных данных показывает, что величина метрологического ресурса может быть увеличена не менее, чем на 15 %. Таким образом, использование представленного алгоритма обработки измеряемой величины с целью компенсации внешних возмущающих воздействий позволяет решить задачу повышения МН ИС при их работе в различных 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. Stewart Peck, D. 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 Measurement Tools with Regard to Climatic Effects

T.I. Chernysheva, M.I. Nistratov

Department “Designing of Electronic and Microprocessor Systems”, TSTU;  
 miha\_tmb@mail.ru

**Key words and phrases:** measurement tools; metrological reliability; operating conditions.

**Abstract:** The paper presents the analysis of the influence of environmental parameters on the performance of metrological reliability. It considers the method of improvement of metrological reliability of measuring instruments using the data on the influence of environmental parameters on the degradation rate of element base.

---

### **Einschätzung und Erhöhung der metrologischen Sicherheit der Meßmittel mit Rücksicht auf die klimatischen Einwirkungen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Analyse des Einflusses der Parameter der Umwelt auf die Kennwerte der metrologischen Sicherheit durchgeführt. Es ist die Methode der Erhöhung der metrologischen Sicherheit der Meßmittel auf Grund der Angaben über dem Einfluß der Parameter der Umwelt auf die Geschwindigkeit der Alterung der Elementenbasis betrachtet.

---

### **Estimation et élévation de la sécurité métrologique des moyens de mesure compte tenu des actions climatiques**

**Résumé:** Est effectuée une analyse de l'influence des paramètres de l'environnement sur les indices de la sécurité métrologique. Est examinée la méthode de l'élévation de la sécurité métrologique des moyens de mesure à la base des données sur l'influence des paramètres de l'environnement sur la vitesse du vieillissement des éléments de la base.

---

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

**Рецензент:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ГОУ ВПО «ТГТУ».

---