

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

**Т.И. Чернышова, В.И. Полухин**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор О.С. Дмитриев*

**Ключевые слова и фразы:** математическая модель; метрологическая надежность; метрологический ресурс; метрологическая характеристика; параметрическая оптимизация; средства неразрушающего контроля; статистическое моделирование.

**Аннотация:** Рассмотрен метод повышения метрологической надежности характеристик на этапе проектирования аналоговых и аналого-цифровых блоков средств неразрушающего контроля, позволяющий увеличить метрологический ресурс, повысить метрологическую надежность проектируемого измерительного средства.

Одним из основных показателей качества средств неразрушающего контроля (**СНК**) свойств материалов и изделий является метрологическая надежность (**МН**) – свойство измерительных средств (**ИС**) сохранять во времени метрологические характеристики в пределах установленных норм. Таким образом, метрологическая надежность определяется характером и темпом изменения нормируемых метрологических характеристик.

В процессе эксплуатации СНК происходит неизбежное ухудшение их метрологических характеристик. Это обусловлено качеством проектирования и изготовления, а также условиями эксплуатации. Так как метрологические характеристики, как и другие характеристики СНК, связаны с параметрами элементов, из которых они изготовлены, то очевидно, что стабильность во времени параметров комплектующих элементов будет определять стабильность характеристики изделия. Поэтому параметром, определяющим для СНК их качество как на этапе проектирования, так и эксплуатации является метрологическая надежность, оцениваемая характером и темпом изменения нормируемых метрологических характеристик

---

Чернышова Татьяна Ивановна – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», декан энергетического факультета; Полухин Вадим Иванович – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», e-mail: poluhinvadim@rambler.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

исследуемого СНК. Так как метрологические характеристики, как и другие характеристики СНК, связаны с параметрами элементов, из которых они изготовлены, то, очевидно, что стабильность во времени параметров комплектующих элементов будет определять и стабильность характеристик изделия. Поэтому при проектировании и эксплуатации СНК ставится задача обеспечения сохранности во времени метрологических характеристик в пределах установленных норм в заданных условиях эксплуатации.

В работе [1] предложена методика оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик на этапе проектирования аналоговых и аналого-цифровых блоков СНК.

Применение разработанной методики позволяет определить изменение во времени метрологических характеристик СНК на основе построения математической модели преобразования входного сигнала измерительным каналом исследуемого СНК с применением методов статистического моделирования, приемов экстраполяции и интерполяции, и в конечном итоге определить показатели МН исследуемых СНК, оценить время наступления метрологического отказа и принять меры по его предупреждению.

Одной из важных задач, возникающих при проектировании СНК с фиксированным уровнем метрологической надежности, является задача оптимального выбора параметров комплектующих элементов проектируемого СНК, обеспечивающих заданную (максимальную) метрологическую надежность. Эта задача может быть сформулирована следующим образом. Пусть на этапе проектирования необходимо обеспечить заданную метрологическую надежность СНК, имеющего  $m$  метрологических характеристик

$$S_1, S_2, \dots, S_m.$$

Вероятность того, что все метрологические характеристики СНК в произвольный момент времени  $t$  будут находиться в пределах допустимых отклонений

$$[S'_1(t), S''_1(t)], [S'_2(t), S''_2(t)], \dots, [S'_m(t), S''_m(t)],$$

равна

$$P[\bar{S}(t, \bar{\varphi})] = \int_{S'_1(t)}^{S''_1(t)} \int_{S'_2(t)}^{S''_2(t)} \dots \int_{S'_m(t)}^{S''_m(t)} P\{S_1(t, \bar{\varphi}), S_2(t, \bar{\varphi}), \dots, S_m(t, \bar{\varphi})\} dS_1 \dots dS_m,$$

где  $P\{S_1(t, \bar{\varphi}), S_2(t, \bar{\varphi}), \dots, S_m(t, \bar{\varphi})\}$  – совместная плотность распределения функций, описывающих изменения во времени метрологических характеристик СНК;  $\bar{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$  – совокупность метрологических характеристик СНК;  $\bar{\varphi}$  – вектор внешних возмущающих воздействий.

Функцию  $P[\bar{S}(t, \bar{\varphi})]$  можно рассматривать как характеристику метрологической надежности. Поэтому задачу обеспечения максимума метрологической надежности СНК можно определить как задачу выбора сово-

купности функции  $\bar{S}^*(t, \bar{\varphi})$ , позволяющей для произвольного момента времени  $t$  получать максимальные значения  $P[\bar{S}(t, \bar{\varphi})]$ :

$$P[\bar{S}^*(t, \bar{\varphi})] = \max\{P[\bar{S}(t, \bar{\varphi})]\}, \quad \bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \quad \bar{\varphi} \in \Omega, \quad (1)$$

при условии сохранения работоспособности СНК:

$$\bar{y}(t, \bar{\varphi}) \in A,$$

где  $\bar{y}(t, \bar{\varphi})$  – совокупность характеристик СНК;  $A$  – область работоспособности;  $\Omega$  – область значений внешних воздействий.

С другой стороны, при тех же исходных данных задача обеспечения требуемого уровня метрологической надежности может рассматриваться как задача выбора некоторой совокупности значений  $\bar{S}^*(t, \bar{\varphi})$ , позволяющей на некотором интервале времени  $(0, t_{\text{зад}})$  обеспечить выполнение условия при заданном уровне значимости  $q$ :

$$\{P[S^*(t, \bar{\varphi})] - P[\bar{S}(t, \bar{\varphi})]\} \leq q, \quad (2)$$

при  $\bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \bar{\varphi} \in \Omega, t \in (0, t_{\text{зад}})$ .

Однако следует подчеркнуть, что использование функции  $P[S(t, \bar{\varphi})]$  в качестве целевой функции при решении задач (1) и (2) является нецелесообразным, так как определение функции  $P\{S_1(t, \bar{\varphi}), S_2(t, \bar{\varphi}), \dots, S_m(t, \bar{\varphi})\}$  на этапе проектирования достаточно затруднительно. Поэтому более пригодным для практического применения является выбор другой характеристики метрологической надежности – метрологического ресурса. Метрологическим ресурсом  $k$ -й метрологической характеристики СНК  $t_{pk}$  будем называть интервал времени  $(0, t_{\text{зад}})$ , в течение которого  $k$ -я метрологическая характеристика данного СНК будет находиться в пределах допустимых значений  $[S'_k(t), S''_k(t)]$  с заданной доверительной вероятностью  $P_k$ .

Величина  $t_{pk}$  в соответствии с [1] определяется решением уравнения

$$M[S_k(t, \bar{\varphi})] + C_k \sigma[S_k(t, \bar{\varphi})] = S''_k(t), \quad k = 1, \dots, m$$

при  $\frac{dS_k(t, \bar{\varphi})}{dt} > 0$  или

$$M[S_k(t, \bar{\varphi})] - C_k \sigma[S_k(t, \bar{\varphi})] = S'_k(t), \quad k = 1, \dots, m$$

при  $\frac{dS_k(t, \bar{\varphi})}{dt} < 0$ , где  $M[S_k(t, \bar{\varphi})], \sigma[S_k(t, \bar{\varphi})]$  – функции, описывающие изменение во времени математического ожидания и среднеквадратического отклонения  $k$ -й метрологической характеристики соответственно;  $C_k$  – коэффициент, выбираемый в зависимости от уровня доверительной вероятности.

При этом метрологический ресурс СНК будет определяться как наименьшее из значений  $t_{pk}$ , то есть

$$t_p = \min_{k=1, \dots, m} \{t_{pk}\}.$$

Тогда задача обеспечения максимальной метрологической надежности может быть сформулирована в виде задачи отыскания максимального метрологического ресурса

$$t_p^* = \max \left\{ \min_{k=1, \dots, m} \{t_{pk}\} \right\} \text{ при } \bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \quad \bar{\varphi} \in \Omega, \quad y(t, \bar{\varphi}) \in A. \quad (3)$$

Соответственно, задача обеспечения требуемого уровня метрологической надежности будет рассматриваться в виде задачи обеспечения требуемого метрологического ресурса  $t_{\text{зад}}$  проектируемого СНК при заданном уровне значимости  $q$ :

$$P\{t_p - t_{\text{зад}} \geq 0\} \geq 1 - q \text{ при } \bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \quad \bar{\varphi} \in \Omega, \quad y(t, \bar{\varphi}) \in A. \quad (4)$$

Как показано в работах [1, 2], изменение во времени метрологических характеристик СНК обусловлено, прежде всего, временными изменениями параметров элементной базы исследуемых СНК. В связи с этим, решением поставленной выше задачи является совокупность параметров комплектующих элементов и, прежде всего, определяющих элементов, которая удовлетворяет условиям (3) или (4).

Задача выбора определенной совокупности параметров комплектующих элементов, которые удовлетворяют условиям (3) или (4), может быть решена в рамках процедуры схмотехнического проектирования исследуемого СНК. На рисунке 1 представлена схема решения поставленной задачи при осуществлении схмотехнического проектирования СНК.

В качестве методов решения задачи могут быть использованы методы параметрической оптимизации [3], позволяющие определять значения параметров, входящих в схему элементов, при которых достигаются заданные или экстремальные значения целевой функции, определяемой, в частности, условиями (3) или (4). При этом, при проведении оптимального выбора параметров элементной базы проектируемого СНК необходимо учитывать дискретные шкалы разрешенных номиналов, например для резисторов и конденсаторов, границы параметров активных элементов и т.д.

Наиболее приемлемыми для практической реализации в рассматриваемых условиях решаемой задачи являются методы случайного поиска, сочетающие в себе случайность при выборе направления поиска с прогнозированием поведения целевой функции на основе проведенных ее вычислений. В пользу применения таких методов говорит их совмещение с приемами статистического моделирования, которые используются при моделировании метрологических характеристик проектируемых СНК.

Решение задачи обеспечения максимальной метрологической надежности иллюстрируется на примере проектирования блока унификации сигнала входным блоком измерительно-вычислительной системы (ИВС) неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов, состоящего из усилителя входного сигнала и аналого-импульсного преобразователя [2, 4]. Названный блок совместно с другими аналоговыми блоками, выполняющими разнообразные функции преобразования измерительных величин, составляет измерительный канал ИВС, который во многом определяет метрологическую надежность ИВС в целом.

Принципиальная электрическая схема блока представлена на рис. 2.



Рис. 1. Схема решения задачи обеспечения требуемой величины метрологического ресурса СНК

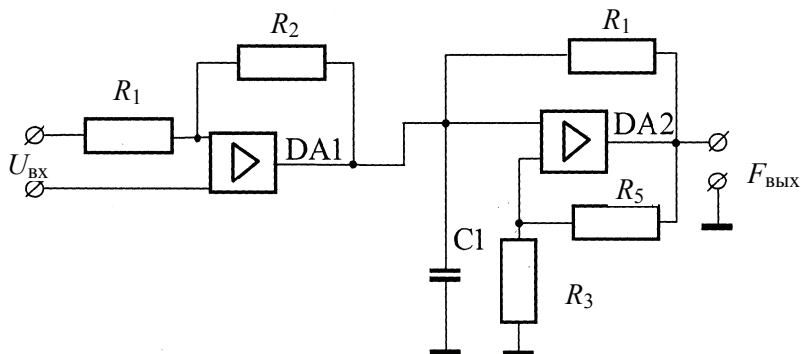


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная входного блока измерительного канала ИВС

Математическая модель нормируемой для этого блока метрологической характеристики, которой является основная относительная погрешность  $\delta$ , имеет вид

$$\begin{cases} \delta = \frac{K - K_n}{K_n}; \\ K = \left( 1 + \frac{R_2}{\frac{K_y}{R_2} - \left( \frac{1}{K_y} - 1 \right) R_1} \right) 2 \lg \left( 1 + \frac{2R_3}{R_5} \right) \left( 1 + \frac{R_4}{\frac{R_3 R_5}{R_3 + R_5}} \right), \end{cases}$$

где  $K$  – коэффициент передачи блока;  $K_n$  – номинальный коэффициент передачи;  $R_1, \dots, R_5$  – параметры комплектующих элементов блока;  $K_y$  – коэффициент усиления элементов DA1, DA2.

Условие сохранения метрологической исправности исследуемого блока для любого произвольного момента времени  $t$  в этом случае запишется в виде

$$\frac{K(t) - K_n}{K_n} < \delta_{\text{доп}},$$

где  $\delta_{\text{доп}}$  – предел допустимой основной погрешности блока (для данного класса устройств  $\delta_{\text{доп}} = 0,05$ ).

Полученный для исследуемого блока показатель метрологического ресурса, рассчитанный по методике [4] и с учетом данных о старении параметров комплектующих элементов, составляет  $t_p = 32500$  ч при доверительной вероятности  $P = 0,997$ .

Рассматривая решение задачи (4) и полагая при этом величину  $t_{\text{зад}} = 40000$  ч, для нормальных условий эксплуатации при использовании алгоритма метода случайного поиска получены следующие номиналы значений определяющих элементов-резисторов МЛТ с разбросом номиналов  $\Delta R = \pm 5\%$ :

$$\begin{cases} R_1 = 110 \text{ Ом}; \\ R_2 = 560 \text{ кОм}; \\ R_3 = 150 \text{ кОм}; \\ R_4 = 110 \text{ кОм}; \\ R_5 = 270 \text{ кОм}. \end{cases}$$

Введение в схему блока резисторов  $R_1 - R_5$  рассчитанных номиналов взамен исходных позволяет увеличить метрологический ресурс на 23 % и, таким образом, повысить метрологическую надежность проектируемой ИВС неразрушающего контроля.

#### *Список литературы*

1. Мищенко, С.В. Метрологическая надежность измерительных средств : монография / С.В. Мищенко, Э.И. Цветков, Т.И. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2001. – 96 с.

2. Чернышова, Т.И. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2001. – 240 с.

3. Ильин, Р.Н. Автоматизация схмотехнического проектирования / Р.Н. Ильин. – М. : Радио и связь, 1987. – 221 с.

4. Пат. 208879 Российская Федерация. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / Чернышова Т.И., Чернышов В.Н. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ». – Заявл. 24.04.94 ; опубл.11.04.96, Бюл. № 8. – 12 с.

---

### **Method of Increasing Metrological Resource of Non-Destructive Control Means**

**T.I. Chernyshova, V.I. Polukhin**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** mathematical model; means of non-destructive control; metrological characteristics; metrological resource; parametric optimization; statistical simulation.

**Abstract:** The method of improving metrological reliability characteristics in the design phase of analog and analog- to-digital blocks of non- destructive control allows increasing the metrological resource, increase metrological reliability of the measuring means.

---

© Т.И. Чернышова, В.И. Полухин, 2011