

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ БЛОКА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курнос

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

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь; измерительный канал; информационно-измерительная система; метрологическая надежность; метрологическая характеристика.

Аннотация: Предложена математическая модель изменения во времени метрологических характеристик электронных измерительных средств (ЭИС), позволяющая оперативно оценивать требуемые в конкретной постановке задачи прогнозирования показатели метрологической надежности. Приведена математическая модель для проектируемых блоков аналого-цифровых преобразований, входящих в структуру ЭИС.

Одной из важнейших характеристик качества измерительных средств (ИС), и в том числе информационно-измерительных систем (ИИС), является метрологическая надежность (МН), характеризующаяся способностью сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм при заданных режимах эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Основным показателем МН аналого-цифрового преобразования (АЦП) ИИС является метрологический ресурс (МР) t_p , определяемый временем пересечения реализаций нестационарного случайного процесса изменения во времени МХ границ поля допуска. Как показывают проведенные исследования [1] МН ИИС в целом определяется метрологической надежностью блоков, входящих в измерительный канал (ИК) ИИС: первичного измерительного преобразователя, нормирующих преобразователей, аналого-цифровых преобразователей. В современной структуре ИК ИИС особое место занимает блок АЦП, который отличается высокой точностью аналого-цифрового преобразования, сложностью и ответственностью выполняемых функций. Соответственно, достаточно важным является вопрос оценки показателей МН данного блока. В статье приводятся результаты оценки МР АЦП с использованием метода аналитико-вероятностного прогнозирования, в основе которого лежит процесс построения математической модели (ММ) функционирования блока и математических моделей его исследуемых характеристик. Следовательно, решение задачи оценки МН АЦП осуществляется с использованием принципов математического моделирования. На рисунке 1 представлена структурная схема АЦП двухтактного интегрирования, являющегося одним из типовых блоков в структуре современных ИСС.

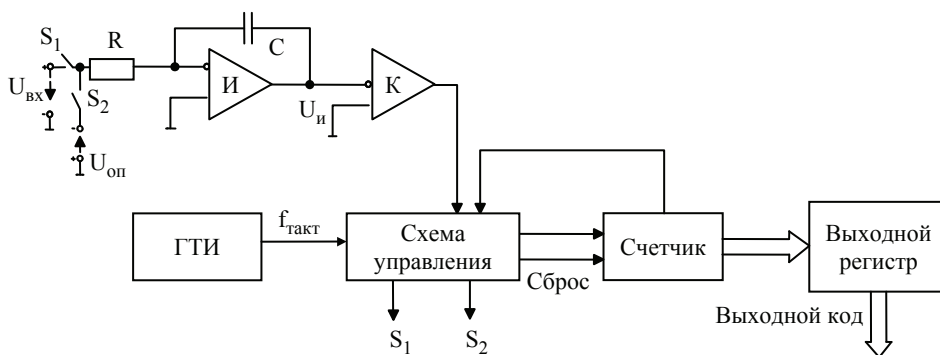


Рис. 1. Структурная схема АЦП двухтактного интегрирования

На начальном этапе решения поставленной задачи составляется ММ функционирования блока на основе анализа исходных структурной и функциональной схем [3, 4]. Преобразование сигнала проходит две стадии: стадию интегрирования и стадию счета. В начале первой стадии ключ S_1 замкнут, ключ S_2 разомкнут. Интегратор И интегрирует входное напряжение $U_{вх}$. После окончания стадии интегрирования ключ S_1 размыкается, а ключ S_2 замыкается и опорное напряжение $U_{оп}$ поступает на вход интегратора, при этом выбирается опорное напряжение, противоположное по знаку входному напряжению. На стадии счета выходное напряжение интегратора линейно уменьшается по абсолютной величине. Стадия счета заканчивается, когда выходное напряжение интегратора переходит через нуль. При этом компаратор К переключается и счет останавливается. В блок АЦП двухтактного интегрирования входят модули: интегратор, компаратор, счетчик и выходной регистр. Функциональная схема АЦП представлена на рис. 2.

Анализ функциональной схемы показал, что наиболее ответственным в метрологическом отношении является модуль интегрирования (интегратор), структурная схема которого представлена на рис. 3.

Составим ММ функционирования интегратора. Так как сопротивление операционного усилителя велико, а его инвертирующий вход практически не потребляет ток, равенство запишем как

$$I_1 = I_2, \quad (1)$$

где I_1, I_2 – токи, проходящие через резистор R и конденсатор C соответственно.



Рис. 2. Функциональная схема АЦП двухтактного интегрирования

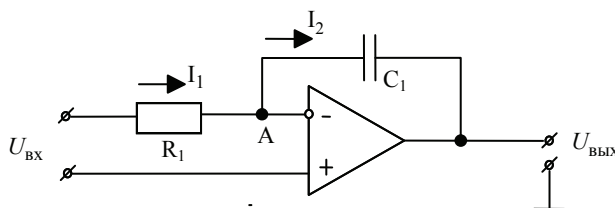


Рис. 3. Схема интегратора

Значения токов определяется выражениями:

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}} - U_A}{R}; \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{U_A - U_{\text{вых}}}{C}, \quad (3)$$

где $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$, U_A – напряжения соответственно входное, выходное и действующее в точке A , определяемое по формуле

$$U_A = \frac{U_{\text{вых}}}{K_0}, \quad (4)$$

где K_0 – коэффициент усиления операционного усилителя.

Подставляя формулы (2) и (3) в формулу (1), получим

$$\frac{U_{\text{вх}} - U_A}{R} = \frac{U_A - U_{\text{вых}}}{C}. \quad (5)$$

Заменяя в (5) U_A в соответствии с (4), получим

$$\frac{U_{\text{вх}} - \frac{U_{\text{вых}}}{K_0}}{R} = \frac{\frac{U_{\text{вых}}}{K_0} - U_{\text{вых}}}{C}, \quad (6)$$

Поделим обе части выражения (6) на $U_{\text{вх}}$, получим

$$1 - \frac{K_p}{K_0} = \frac{\frac{K_p}{K_0} - K_p}{C}, \quad (7)$$

где K_p – общий коэффициент передачи АЦП двухтактного интегрирования,

$$K_p = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Таким образом, получим выражение для расчета коэффициента передачи инвертирующего усилителя

$$K_p = \frac{C}{\frac{C}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right)R}. \quad (8)$$

Каскад на D_{A1} собран по схеме инвертирующего усилителя и входит в схему компенсации тока утечки C_1

$$K_p = K_{DA1} = \frac{R_1}{\frac{R_1}{K_{0DA1}} + \left(\frac{1}{K_{0DA1}} - 1\right)C_1}. \quad (9)$$

Математическая модель функционирования интегратора имеет вид

$$K_p(t) = \frac{R_1(t)}{\frac{R_1(t)}{K_{0DA1}} + \left(\frac{1}{K_{0DA1}} - 1\right)C_1(t)}. \quad (10)$$

Следующим этапом реализации метода аналитико-вероятностного прогнозирования, применяемого при проектировании АЦП и анализе его МН, является построение ММ МР [2]. Из выражения (10) можно получить ММ метрологиче-

Результаты статистического моделирования

Время t , ч	$m_{\delta} \cdot 10^2$	$\sigma_{\delta} \cdot 10^4$
0	2,7002	0,9986
500	2,6999	1,0829
1000	2,6999	1,5738
2000	2,6988	1,8698
5000	2,6976	2,0345

Таблица 1

ской характеристики блока – основной относительной погрешности $\delta(t)$, общая формула расчета которой представлена в виде

$$\delta(t) = \frac{K_{p. \text{ ном}} - K_p(t)}{K_{p. \text{ ном}}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $K_{p. \text{ ном}}$ – номинальный коэффициент передачи модуля; t – время эксплуатации; $|\delta(t)| < |\delta_{\text{доп}}|, \forall t \in T_1, \forall t \in T_2$ – условие метрологической исправности; T_1 и T_2 – области контроля и прогноза соответственно.

С учетом выражений (10) и (11) математическая модель основной относительной погрешности интегратора имеет вид

$$\begin{cases} \delta(t) = \frac{K_{p. \text{ ном}} - K_p(t)}{K_{p. \text{ ном}}}; \\ K_p(t) = \frac{R_1(t)}{\frac{R_1(t)}{K_{0DA_1}} + \left(\frac{1}{K_{0DA_1}} - 1 \right) C_1(t)}. \end{cases} \quad (12)$$

С использованием статистического моделирования основной относительной погрешности строится ММ изменения во времени МХ проектируемого АБ электронных измерительных средств, представляющая совокупность аналитических зависимостей, полученных для функций временного изменения математического ожидания МХ $M_{\delta}(t)$ и функций $\Psi_{\pm\sigma}(t)$, которые характеризуют изменение границ отклонения возможных значений исследуемой МХ от среднего значения с доверительной вероятностью $P = 0,997$

$$\begin{cases} m_{\delta}(t); \\ \Psi_{\pm\sigma}(t) = m_{\delta}(t) \pm 3\sigma_{\delta}(t), \end{cases} \quad (13)$$

где $\sigma_{\delta}(t)$ – среднеквадратическое отклонение МХ в различные моменты времени эксплуатации.

Результаты статистического моделирования основной относительной погрешности в заданные моменты времени контроля приведены в табл. 1.

Построенная по результатам статистического моделирования ММ изменения во времени основной относительной погрешности интегратора имеет вид:

$$\begin{aligned} \Psi_{-\sigma}(t) &= 4,239 \cdot 10^{-11} t^3 - 3,256 \cdot 10^{-9} t^2 + 2,851 \cdot 10^{-7} t + 1,932 \cdot 10^{-2}; \\ m_{\delta}(t) &= 8,234 \cdot 10^{-11} t^3 + 6,338 \cdot 10^{-9} t^2 + 3,792 \cdot 10^{-7} t + 2,437 \cdot 10^{-2}; \\ \Psi_{+\sigma}(t) &= 2,172 \cdot 10^{-11} t^3 - 6,625 \cdot 10^{-9} t^2 + 4,507 \cdot 10^{-7} t + 3,931 \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Использование принципа экстраполяции модели (14) на область будущих значений времени эксплуатации рассматриваемого модуля в структуре АЦП позволяет с доверительной вероятностью $P = 0,997$ определить величину его МР исследуемого модуля $t_p = 41400$ ч. Полученное значение выбранного показателя МН может рассматриваться как верхняя граница вероятностной оценки МР блока АЦП в целом. Таким образом, использование метода аналитико-вероятностного

прогнозирования с применением математического моделирования МХ исследуемых измерительных средств позволяет оценить показатели их МН уже на начальных этапах проектирования.

Список литературы

1. Мищенко, С. В. Метрологическая надежность измерительных средств / С. В. Мищенко, Э. И. Цветков, Т. И. Чернышова. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 96 с.
2. Цветков, Э. И. Метрология. Модели объектов, процедур и средств измерений. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э. И. Цветков. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
3. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209 – 215. doi: 10.17277/vesnik.2017.02.pp.209-215
4. Чернышова, Т. И. Применение математического моделирования при реализации методов оценки и повышения метрологического ресурса аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 381 – 387. doi: 10.17277/vesnik.2015.03.pp.381-387

Application of Mathematical Modeling Methods in the Assessment of Metrological Reliability of Analog-to-Digital Converter Unit

T. I. Chernyshova, R. Yu. Kurnosov

*Department of Designing of Radio-Electronic and Microprocessor Systems,
TSTU, Tambov, Russia; romankurnosov@rambler.ru*

Keywords: analog-to-digital converter; measuring channel; metrological reliability and metrological characteristics of information-measuring system.

Abstract: The mathematical model of metrological characteristics of electronic measuring instruments (EMS) changing in time is proposed. The model is used for quick assessment of the required metrological reliability indicators for the specific problem. The mathematical model for the designed analog-to-digital converter units within the EMS structure is given.

References

1. Mishchenko S.V., Tsvetkov E.I., Chernyshova T.I. *Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv* [Metrological reliability of measuring equipment], Moscow: Mashinostroenie-1, 2001, 96 p. (In Russ.)
2. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli ob"ektov, protsedur i sredstv izmerenii. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez* [Metrology. Models of objects, procedures and measuring instruments. Metrological analysis. Metrological synthesis], St. Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU "LETI", 2014, 293 p. (In Russ.)

3. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. [Mathematical Modeling of the Metrological Characteristics in Assessment of Electronic Metrological Reliability of Electronic Measuring Equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 209-215, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Chernyshova T.I., Tret'yakov V.V. [Application of Mathematical Modeling for Evaluation Methods and Improvement of Metrological Resource of Analog Units of Data-Measuring Systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 381-387, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387 (In Russ., abstract in Eng.)

Anwendung der Methoden der mathematischen Modellierung bei der Bewertung der metrologischen Zuverlässigkeit des Analog-Digital-Umsetzers

Zusammenfassung: Es ist ein mathematisches Modell der Änderung der messtechnischen Eigenschaften elektronischer Messmittel (EMM) im zeitlichen Verlauf vorgeschlagen, das ermöglicht, die für eine bestimmte Aussage des Vorhersageproblems erforderlichen messtechnischen metrologischen Zuverlässigkeitsparameter schnell einzuschätzen. Ein mathematisches Modell für die projizierten Blöcke der analog-digitalen Transformationen, die ein Teil der EMM-Struktur sind, ist angegeben.

Application des méthodes de la modélisation mathématique lors de l'évaluation métrologique de la fiabilité du bloc du convertisseur analogique-numérique

Résumé: Est proposé un modèle mathématique de la variation dans le temps des caractéristiques métrologiques des moyens de mesure électroniques (MME) permettant d'évaluer rapidement des tâches requises, en particulier, de la fiabilité de la prévision des indicateurs métrologiques. Est cité un modèle mathématique pour les blocs conçus des convertisseurs analogiques et numériques inclus dans la structure de MME.

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

Рецензент: *Шамкин Валерий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.