

**ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СТРУКТУРЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов, М. А. Каменская

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; rotankurnosov@yandex.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 оценивать требуемые в конкретной постановке задачи прогнозирования показатели метрологической надежности. Приведены математические модели модулей проектируемого блока аналого-цифрового преобразователя, входящего 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 преобразователя (**АЦП**) ИИС является метрологический ресурс (**МР**) t_p , определяемый временем пересечения реализаций нестационарного случайного процесса изменения во времени МХ границ поля допуска. Как показывают проведения исследования [1], МН ИИС в целом определяется метрологической надежностью блоков, входящих в измерительный канал (**ИК**) ИИС: первичный измерительный преобразователь, нормирующие преобразователи, АЦП. В современной структуре ИК ИИС особое место занимает блок АЦП, который отличается высокой точностью, сложностью и ответственностью выполняемых функций. Соответственно, достаточно важным является вопрос оценки показателей МН данного блока, прежде всего МР. В статье приводятся результаты оценки МР АЦП с использованием метода аналитико-вероятностного прогнозирования, в основе которого лежит процесс математического моделирования блока.

На рисунке 1 представлена структурная схема АЦП двухтактного интегрирования, являющегося одним из типовых блоков в структуре современных ИС. Устройство ADC32RF45 представляет собой 14-разрядный, с быстродействием 3.0-гигацикла в секунду, двухканальный, АЦП, который поддерживает выборку радиочастотного (RF) сигнала с входными частотами до 4 ГГц и за его пределами. Устройство ADC32RF45 обеспечивает спектральную плотность шума 155 дБ/Гц, а также динамический диапазон и изоляцию канала в большом диапазоне входных частот. Каждый канал АЦП может быть подключен к двухдиапазонному цифровому преобразователю (DDC) с тремя независимыми 16-битными генераторами с числовым управлением (NCO) на двухдиапазонный цифровой преобразователь для фазово-когерентной скачкообразной перестройки частоты. Устройство ADC32RF45 поддерживает последовательный интерфейс JESD204B с детерминированной задержкой на основе подкласса 1 с использованием скорости передачи данных до 12,5 Гбит/с до четырех полос на двухдиапазонный цифровой преобразователь. Также устройство поддерживает промышленный диапазон температур (−40...+85 °С).

На начальном этапе решения поставленной задачи составляется математическая модель (ММ) функционирования блока на основе анализа исходной функциональной схемы (рис. 2).

Анализ функциональной схемы АЦП показывает, что МН всего блока будет определяться показателем МН, и, в частности, величиной МР аналоговых модулей, составляющих ИК: входной высокочастотной цепи, буферного усилителя и преобразователя,

$$t_{p\text{АЦП}} = \min_{i=1,2,3} \{t_{pi}\}, \quad (1)$$

где t_{pi} – значение МР рассматриваемых модулей АЦП.

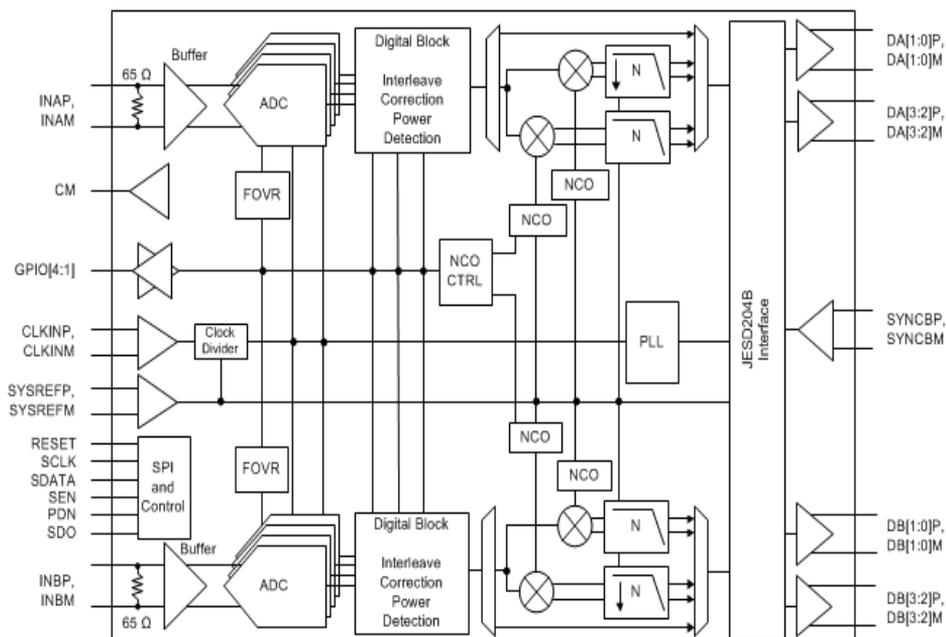


Рис. 1. Функциональная схема двухканального 14-разрядного, 3.0-гигацикла в секунду, АЦП

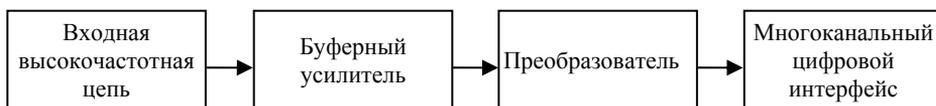


Рис. 2. Функциональная схема АЦП при подаче переменного высокочастотного напряжения

В соответствии с (1) использование для оценки МР аналитико-вероятностного метода предполагает [2, 3]:

- последовательное осуществление математического моделирования рассматриваемых модулей на основе анализа их принципиальных схем;
- математическое моделирование исследуемой МХ, которой является основная относительная погрешность δ ;
- статистическое моделирование значения основной относительной погрешности в различные моменты времени предстоящей эксплуатации по значениям параметров элементной базы каждого из модулей;
- построение ММ 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 $P = 0,997$

$$\begin{cases} m_\delta(t); \\ \Psi_{\pm}(t) = m_\delta(t) \pm 3\sigma(t), \end{cases} \quad (2)$$

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

Условие сохранения метрологической исправности позволяет оценить величину МР каждого из рассматриваемых модулей экстраполяцией $m_\delta(t)$, функцией $\psi_{\pm\sigma}(t)$ на область предстоящей эксплуатации модуля, в общем виде представляемое формулой

$$|\delta(t)| < \delta_{\text{доп}}, \quad \forall t \in T_1, \quad \forall t \in T_2, \quad (3)$$

где $\delta(t)$ – изменение во времени погрешности, которое описывается функцией $m_\delta(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$; T_1, T_2 – области контроля и прогноза соответственно.

Рассмотрим модуль входной высокочастотной цепи (рис. 3).

Для решения поставленной задачи прогнозирования основной относительной погрешности АЦП целесообразно использовать прогнозирующий параметр, в качестве которого выбран коэффициент преобразования. Соответственно коэффициент передачи рассматриваемого модуля равен

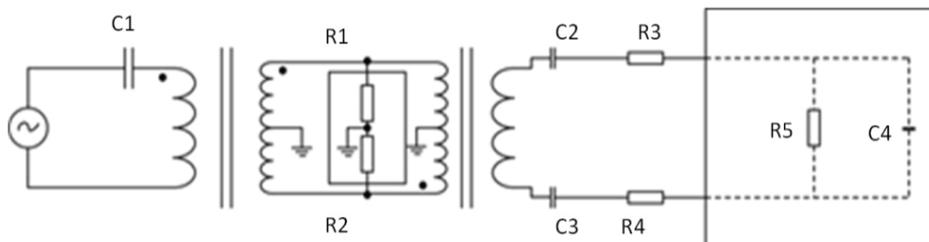


Рис. 3. Структурная схема входной высокочастотной цепи

$$K_p = \frac{R_5}{C_1 \left(\frac{2R_2}{R_1 + R_2} \right)} \frac{R_5}{2C_3 R_3 \left(\frac{R_3 + R_4}{2R_4} \right)}. \quad (4)$$

С учетом выражения (4) ММ исследуемой метрологической характеристики этого модуля, а именно основной относительной погрешности, представляется в виде

$$\begin{cases} \delta = \frac{K_{p \text{ ном}} - K_{p \text{ расч}}}{K_{p \text{ ном}}} \cdot 100\%; \\ K_p = \frac{R_5}{C_1 \left(\frac{2R_2}{R_1 + R_2} \right)} \frac{R_5}{2C_3 R_3 \left(\frac{R_3 + R_4}{2R_4} \right)}, \end{cases} \quad (5)$$

где $K_{p \text{ ном}}$, $K_{p \text{ расч}}$ – номинальный и расчетный коэффициенты передачи модулей соответственно.

С использованием статистического моделирования основной относительной погрешности строится ММ изменения во времени МХ проектируемого модуля вида (2). Построенная по результатам статистического моделирования ММ изменения во времени основной относительной погрешности имеет вид

$$\begin{cases} \psi_{-\sigma}(t) = 7,245 \cdot 10^{-15} t^3 + 9,921 \cdot 10^{-11} t^2 + 5,377 \cdot 10^{-7} t + 0,032; \\ m_{\delta}(t) = 5,698 \cdot 10^{-15} t^3 - 2,063 \cdot 10^{-11} t^2 + 4,751 \cdot 10^{-7} t + 0,005; \\ \psi_{+\sigma}(t) = 4,247 \cdot 10^{-15} t^3 - 0,224 \cdot 10^{-12} t^2 + 1,337 \cdot 10^{-7} t - 0,004. \end{cases} \quad (6)$$

Определение с учетом выражения (6) величин МР с помощью экстраполяции функций $\psi_{\pm\sigma}(t)$, $m_{\delta}(t)$, на область будущих значений времени эксплуатации и с учетом условия (3), показывает, что с доверительной вероятностью $P = 0,997$ МР рассматриваемого модуля составляет 32 900 ч.

Рассмотрим модуль буферного усилителя, структурная схема которого представлена на рис. 4.

Составим ММ функционирования модуля. Так как сопротивление буферного усилителя очень велико, а его инвертирующий вход практически не потребляет ток, то

$$I_1 = I_2, \quad (7)$$

где I_1 , I_2 – токи, проходящие через резисторы R_1 и R_2 соответственно.

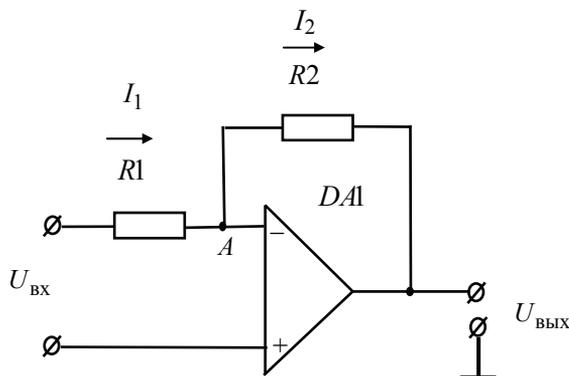


Рис. 4. Структурная схема буферного усилителя

Значения токов определяются следующим образом:

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_A}{R_1}; \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{U_A - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}, \quad (9)$$

где U_A – напряжение, действующее в точке A , определяемое по выражению

$$U_A = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0}, \quad (10)$$

где K_0 – коэффициент усиления буферного усилителя.

Подставляя выражения (8) и (9) в равенство (7), получаем

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - U_A}{R_1} = \frac{U_A - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}. \quad (11)$$

Осуществив замену в (11) в соответствии с (10), имеем следующее равенство

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0}}{R_1} = \frac{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}. \quad (12)$$

После деления обеих частей (12) на $U_{\text{ВХ}}$ получаем соотношение

$$1 - \frac{K_p}{K_0} = \frac{K_p}{K_0} - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (13)$$

где $K_p = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$.

Таким образом, получим выражение для расчета коэффициента передачи инвертирующего усилителя

$$K_p = \frac{R_2}{\frac{R_2}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right)R_1}. \quad (14)$$

Математическая модель функционирования буферного усилителя имеет вид

$$K_p(t) = \frac{R_2(t)}{\frac{R_2(t)}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right)R_1(t)}. \quad (15)$$

Соответственно, математическая модель основной относительной погрешности модуля буферного усилителя запишется в виде

$$\begin{cases} \delta(t) = \frac{K_{p \text{ ном}} - K_p(t)}{K_{p \text{ ном}}} \cdot 100\%; \\ K_p(t) = \frac{R_2(t)}{\frac{R_2(t)}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right)R_1(t)}. \end{cases} \quad (16)$$

Статистическое моделирование значений исследуемой МХ в различные моменты времени его эксплуатации по данным об изменении во времени параметров элементной базы модуля позволяет построить ММ изменения во времени основной относительной погрешности модуля буферного усилителя в виде

$$\begin{cases} \psi_{-\sigma}(t) = 6,50 \cdot 10^{-16} t^3 - 5,27 \cdot 10^{-12} t^2 + 2,79 \cdot 10^{-7} t + 1,92 \cdot 10^{-2}; \\ m_{\delta}(t) = 9,22 \cdot 10^{-16} t^3 - 7,33 \cdot 10^{-12} t^2 + 3,97 \cdot 10^{-7} t + 2,47 \cdot 10^{-2}; \\ \psi_{+\sigma}(t) = 1,19 \cdot 10^{-15} t^3 - 9,41 \cdot 10^{-12} t^2 + 5,16 \cdot 10^{-7} t + 3,02 \cdot 10^{-2}. \end{cases} \quad (17)$$

Определение с учетом выражения (16) и условия (3) величины МР с помощью экстраполяции функций $\psi_{\pm\sigma}(t)$, $m_{\delta}(t)$ на область будущих значений времени эксплуатации показывает, что с доверительной вероятностью $P = 0,997$ МР рассматриваемого модуля составляет 24 600 ч.

Следующим модулем, составляющим ИК АЦП, является модуль преобразования, математической моделирование которого осуществляется на основе анализа его структурной схемы (рис. 5).

Работа данного преобразователя основана на принципе баланса зарядов. Вначале ток $I_{\text{ВХ}}$, пропорциональный входному напряжению, проходит через резистор R, заряжая конденсатор C. По мере накопления заряда на конденсаторе интегратора И, выходное напряжение входного операционного усилителя возрастает. Когда выходное напряжение операционного усилителя проходит ноль, срабатывает компаратор К и мультивибратор вырабатывает одиночный импульс длительностью $t_{\text{ОС}}$ и на время импульса замыкает ключ S. За это время ток $(I_{\text{ОП}} - I_{\text{ВХ}})$ проходит через конденсатор интегратора. Тем самым конечная величина заряда, прошедшая через конденсатор за время данного цикла, равна $(I_{\text{ОП}} - I_{\text{ВХ}})t_{\text{ОС}}$. После размыкания ключа S конденсатор вновь начинает заряжаться и возвращается обратно к начальному значению, после чего опять срабатывает компаратор К, и цикл повторяется вновь. Тем самым заряд, выходящий из конденсатора С, равен заряду, полученному конденсатором в каждом цикле:

$$(I_{\text{ОП}} - I_{\text{ВХ}})t_{\text{ОС}} = I_{\text{ВХ}} \left(\frac{1}{f_{\text{ВЫХ}}} - t_{\text{ОС}} \right). \quad (18)$$

где $f_{\text{ВЫХ}}$ – выходная частота; $I_{\text{ОП}}$ – источник опорного тока.

Для исследования МР преобразователя вначале получим зависимость выходной частоты преобразователя от входного напряжения.

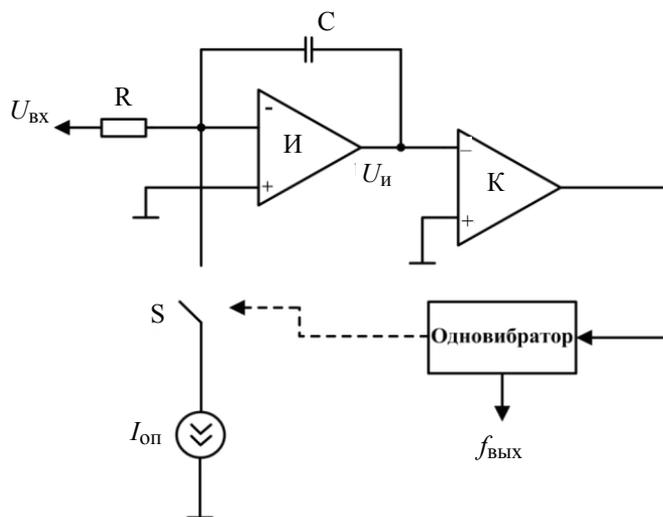


Рис. 5. Структурная схема преобразователя

Входной ток $I_{\text{вх}}$ пропорционален входному напряжению

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / R_1. \quad (19)$$

Поделив правую и левую части уравнения баланса зарядов (18) на $I_{\text{вх}}$ и преобразовав, получим

$$f_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{оп}}} \frac{1}{t_{\text{OS}}}. \quad (20)$$

С учетом (19) уравнение (20) примет вид

$$f_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 I_{\text{оп}}} \frac{1}{t_{\text{OS}}}. \quad (21)$$

Параметры источника тока $I_{\text{оп}}$ задаются следующими элементами: R_6 , R_7 задают рабочую точку транзистора VT2; R_8 задает ток эмиттера. Уравнение, описывающее работу источника тока, имеет вид

$$I_{\text{оп}} = \frac{2U_{\text{п}} \frac{R_7}{R_6 + R_7} + U_{\text{БЭ}}}{R_8}, \quad (22)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение питания схемы (в данном случае ± 15 В); $U_{\text{БЭ}}$ – напряжение падения на ($p-n$)-переходе транзистора VT2 ($\approx 0,7$ В).

Длительность импульса одновибратора в основном определяется постоянной времени цепочки $C_3 R_3$

$$t_{\text{OS}} = C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{\text{VD1}}}{U_{\text{OYmax}}} \right) \right], \quad (23)$$

где U_{VD1} – напряжение падения на открытом диоде ($\approx 0,7$ В); U_{OYmax} – максимальное выходное напряжение ОУ (амплитуда на выходе современных ОУ близка к напряжению питания и составляет $U_{\text{п}} \approx 1$ В).

Запишем уравнение (21) с учетом (22) и (23) и получим конечное уравнение, описывающее зависимость выходной частоты преобразователя от входного напряжения

$$f_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{\text{БЭ}}} \frac{1}{C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{\text{VD1}}}{U_{\text{OYmax}}} \right) \right]}. \quad (24)$$

Нормируемой МХ исследуемого преобразователя является основная относительная погрешность, вычисляемая по следующей формуле

$$\delta = \frac{f_{\text{вых. изм}} - f_{\text{вых. расч}}}{f_{\text{вых. расч}}} \cdot 100\%, \quad (25)$$

где $f_{\text{вых. изм}}$, $f_{\text{вых. расч}}$ – измеренное и рассчитанное значения выходной частоты.

Коэффициент преобразования модуля запишется в виде

$$K_p = \frac{1}{R_1 \frac{U_{\text{п}} \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{\text{БЭ}}}{R_8}} \frac{1}{C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{\text{VDI}}}{U_{\text{OYmax}}} \right) \right]}. \quad (26)$$

Окончательно математическая модель нормируемой МХ преобразователя имеет следующий вид

$$\begin{cases} \delta = \frac{K_{\text{р ном}} - K_p(t)}{K_{\text{р ном}}} \cdot 100\%; \\ K_p = \frac{1}{R_1 \frac{U_{\text{п}} \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{\text{БЭ}}}{R_8}} \frac{1}{C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{\text{VDI}}}{U_{\text{OYmax}}} \right) \right]} \end{cases} \quad (27)$$

Построенная по результатам статистического моделирования ММ изменения во времени основной относительной погрешности исследуемого модуля буферного усилителя имеет вид

$$\begin{cases} \psi_{-\sigma}(t) = 129,03 - 1,751 \cdot 10^{-3}t - 3,737 \cdot 10^{-10}t^2; \\ m_{\delta}(t) = 129,9303 - 1,75 \cdot 10^{-3}t + -3,736 \cdot 10^{-10}t^2; \\ \psi_{+\sigma}(t) = 130,806 - 1,749 \cdot 10^{-3}t - 3,735 \cdot 10^{-10}t^2. \end{cases} \quad (28)$$

С использованием выражений (28) и (3) величина МР данного модуля равна $t_p = 23\,000$ ч с доверительной вероятностью $P = 0,997$.

Полученные значения МР для каждого из аналоговых модулей, составляющих измерительный канал, дают возможность согласно выражению (1) определить МР всего блока в целом. Величина МР для АЦП в целом составляет 23 000 ч. Таким образом, применение метода аналитико-вероятностного прогнозирования с использованием при его реализации приемов математического моделирования позволяет дать вероятностную оценку показателей МН блока АЦП уже на начальных этапах его проектирования при минимальной априорной информации.

Список литературы

1. Цветков, Э. И. Метрология. Модели объектов, процедур и средств измерений. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э. И. Цветков. – СПб. : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
2. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209 – 215. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215
3. 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/vestnik.2015.03.pp.381-387

Metrological Reliability Assessment of Analog-to-Digital Converter in the Structure of the Information-Measuring System at the Design Stage

T. I. Chernyshova, R. Yu. Kurnosov, M. A. Kamenskaya

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

Keywords: analog-to-digital converter; measuring channel; information measuring system; metrological reliability; metrological characteristic.

Abstract: A mathematical model of the time variation of the metrological characteristics of electronic measuring instruments (EMIs) is proposed. It is used to assess the metrological reliability indicators required in a specific formulation of the prediction problem. Mathematical models of modules of the designed block of the analog-digital converter included in the EMIs structure are given.

References

1. 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, 2014, 293 p. (In Russ.)
2. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. [Mathematical modeling of metrological characteristics in assessing the metrological reliability of electronic measuring instruments], *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.)
3. Chernyshova T.I., Tret'yakov V.V. [Application of mathematical modeling in the implementation of methods for assessing and improving the metrological resource of analog blocks of information-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.)

Bewertung der metrologischen Zuverlässigkeit des Analog-Digital-Wandlers in der Struktur des Informations-und Messsystems in der Entwurfsphase

Zusammenfassung: Es ist ein mathematisches Modell zur Änderung des zeitlichen Verlaufs der messtechnischen Eigenschaften der elektronischen Messgeräte (EIS) vorgeschlagen, das ermöglicht, die in der bestimmten Aufgabenstellung des Vorhersagens erforderlichen messtechnischen Zuverlässigkeitsindikatoren zu bewerten. Angegeben sind mathematische Modelle von Modulen des entworfenen Blocks des Analog-Digital-Wandlers, der in der EIS-Struktur enthalten ist.

Évaluation de la fiabilité métrologique du convertisseur analogique-numérique dans la structure du système d'information et de mesure à l'étape de la phase de la conception

Résumé: Est proposé un modèle mathématique de l'évolution dans le temps des caractéristiques métrologiques des instruments de mesure électroniques (IME), permettant d'évaluer les indicateurs de la fiabilité métrologique qui sont exigés dans la situation donnée. Sont cités les modèles mathématiques des modules de l'unité conçue du convertisseur analogique-numérique qui fait partie de la structure IME.

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

Рецензент: *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.