

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ИСПРАВНОСТИ БЛОКА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СТРУКТУРЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов✉, П. И. Карелин

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

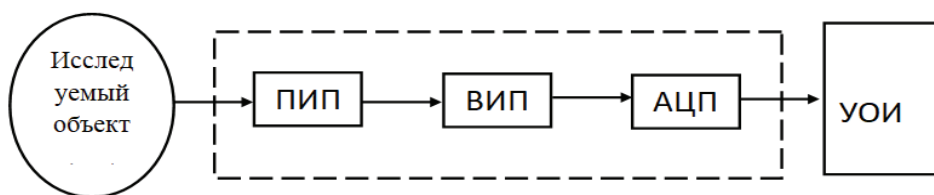
**Ключевые слова:** аналитико-вероятностный метод прогнозирования; аналого-цифровой преобразователь; информационно-измерительная система; метрологическая исправность; метрологическая надежность; метрологическая характеристика; метрологический ресурс; погрешность; средства измерений.

**Аннотация:** Рассмотрено определение метрологической исправности блока аналого-цифрового преобразования в структуре информационно-измерительных систем. Показано решение задачи оценки метрологической надежности (МН) блока аналого-цифрового преобразования (АЦП) на этапе проектирования на основе использования аналитико-вероятностного метода прогнозирования. Разработанная методика оценки МН блока аналого-цифрового преобразования на этапе его проектирования позволяет оперативно оценить вероятность сохранения метрологической исправности блока АЦП в целях решения задачи оценки метрологической надежности как самого блока, так и ИИС в целом.

---

### Введение

Информационно-измерительные системы (ИИС) находят широкое применение в практике измерительных экспериментов во всех отраслях промышленного производства и научных исследованиях. Разработка метрологического обеспечения средств измерений (СИ) на стадии их проектирования является определяющим фактором в достижении требуемой точности и достоверности проводимых измерительных экспериментов с использованием таких ИИС. Особую значимость в структуре метрологического обеспечения имеет показатель метрологической исправности, определяющий состояние ИИС, при котором метрологические характеристики (МХ) соответствуют установленным требованиям, а также показателям метрологической надежности (МН), оцениваемым способностью ИИС сохранять установленные пределами допуска  $[-S_{\text{доп}}, +S_{\text{доп}}]$  значения метрологической характеристики  $S$  при определенных режимах и условиях использования. Таким образом, указанные составляющие метрологического обеспечения определяются изменением во времени МХ ИИС. На рисунке 1 представлена обобщенная структурная схема ИИС. Как известно, метрологическая надежность ИИС определяется уровнем МН блоков измерительного канала.



**Рис. 1. Обобщенная структурная схема ИИС:**

ПИП, ВИП – соответственно первичный и вторичный измерительные преобразователи;  
УОИ – устройство обработка информации

Важное место в структуре измерительного канала ИИС отводится блоку аналого-цифрового преобразования (АЦП) [1 – 5]. Среди требований, предъявляемых к рассматриваемому блоку, значительное место занимает высокая точность, сложность, важность выполняемых функций, а также широта функциональных возможностей.

Все перечисленные обстоятельства определяют значимость для этого блока в структуре ИИС обеспечения требуемого уровня метрологических характеристик и МН соответственно. Следовательно, определение МН АЦП является весьма важным при оценке уровня метрологической надежности проектируемой информационно-измерительной системы в целом.

Решение задачи оценки МН АЦП на этапе проектирования проводится с использованием метода аналитико-вероятностного прогнозирования [1 – 3]. Основу метода составляет математическое моделирование нестационарных случайных процессов изменения во времени метрологических характеристик проектируемых СИ, что позволяет дать вероятностную оценку показателей МН, к числу которых относится величина метрологического ресурса (при решении задачи обратного прогнозирования) и вероятность сохранения метрологической исправности (при решении задачи прямого прогнозирования) в произвольный момент времени предстоящей эксплуатации. Разработанный способ оценки метрологического ресурса АЦП и сформированная на его основе методика, позволяющие оперативно и корректно оценить требуемый показатель, представлены в [1, 6].

Не менее важным для оценки качества и МН АЦП и ИИС в целом является показатель вероятности сохранения метрологической исправности  $P_{исп}(t)$  на этапе предстоящей эксплуатации проектируемого ИС. Важной априорной информацией для предстоящей эксплуатации АЦП является прогноз величины данного показателя прежде всего на интервале времени, определяемом временем предстоящих метрологических проверок от начала эксплуатации, то есть  $t_0 = 0$  до  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , где  $n$  – число предстоящих проверок АЦП на этапе эксплуатации.

### **Оценка метрологической надежности АЦП получением численной оценки величины $P_{исп}(t)$**

Рассмотрим оценку МН АЦП получением численной оценки значений вероятности сохранения метрологической исправности  $P_{исп}(t)$  в указанные моменты времени эксплуатации, определяемые временем предстоящих проверок. На рисунке 2 представлена функциональная схема АЦП. В состав измерительного канала рассматриваемого устройства входят модули: цепь согласования сигналов, выравнивающий усилитель и устройство настройки частоты. При этом показатель  $P_{исп}(t)$  АЦП можно определить по значениям вероятности сохранения метрологической исправности на моменты предстоящих проверок  $t_1, t_2, \dots, t_n$  составляющих АЦП модулей.



Рис. 2. Функциональная схема блока АЦП

Успешное решение задачи оценки МН на этапе проектирования АЦП определяется адекватностью применяемых математических моделей.

Математическая модель функционирования каждого из модулей при условии постоянства внешних влияющих факторов выражается зависимостью значения выходного параметра модуля  $y$  от текущего значения входного сигнала  $x$  блока и параметров комплектующих элементов перечисленных модулей

$$y = F_1(x, \vec{\xi}), \quad (1)$$

где  $\vec{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k\}$  – вектор параметров комплектующих модуль элементов.

Математическая модель метрологической характеристики каждого модуля, входящего в структуру АЦП ИИС, имеет вид

$$S = F_2(x, \vec{\xi}). \quad (2)$$

С учетом выражений (1) и (2) математические модели для каждого модуля, составляющих блок АЦП, имеют следующий вид:

– цепь согласования сигналов (**ЦСС**):

$$U_{\text{ВХ}}^{\text{ЦСС}} = F_{1.1}(x, \vec{\xi}); \quad (3)$$

$$S^{\text{ЦСС}} = F_{1.2}(x_1, \vec{\xi}^{\text{ЦСС}}); \quad (4)$$

– выравнивающий усилитель (**ВУ**):

$$U_{\text{ВХ}}^{\text{ВУ}} = F_{2.1}(x, \vec{\xi}); \quad (5)$$

$$S^{\text{ВУ}} = F_{2.2}(x_2, \vec{\xi}^{\text{ВУ}}); \quad (6)$$

– устройство настройки частоты (**УНЧ**):

$$U_{\text{ВХ}}^{\text{УНЧ}} = F_{3.1}(x, \vec{\xi}); \quad (7)$$

$$S^{\text{УНЧ}} = F_{3.2}(x_3, \vec{\xi}^{\text{УНЧ}}), \quad (8)$$

где  $\vec{\xi}^{\text{ЦСС}}$ ,  $\vec{\xi}^{\text{ВУ}}$ ,  $\vec{\xi}^{\text{УНЧ}}$  – векторы параметров комплектующих элементов модулей цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно;  $U_{\text{ВХ}}^{\text{ЦСС}}$ ,  $U_{\text{ВХ}}^{\text{ВУ}}$ ,  $U_{\text{ВХ}}^{\text{УНЧ}}$  – входные напряжения модуля цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно.

Математические модели (3) – (8) служат основой для статистического моделирования и построения математических моделей изменения во времени исследуемых МХ, определяемых для каждого из модулей функциями временного изменения математического ожидания МХ и функциями, которые характеризуют изменения границ отклонения возможных значений исследуемой МХ от среднего значения. В общем виде такие модели для каждого из модулей могут быть представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} m_S(t); \\ \Psi_{\pm\sigma}(t) = m_S(t) \pm c\sigma_S(t), \end{cases} \quad (9)$$

где  $c$  – постоянный коэффициент, выбираемый в зависимости от заданного уровня доверительной вероятности  $P_{\text{дов}}$  ( $c = 3$ , при  $P_{\text{дов}} = 0,973$ );  $m_S(t)$  – математическое ожидание МХ;  $\sigma_S(t)$  – среднеквадратическое отклонение МХ в произвольные моменты эксплуатации.

Полученные математические модели изменения во времени МХ каждого из модулей в структуре АЦП позволяют рассчитать вероятность сохранения метрологической исправности модулей и АЦП в целом [2, 7]. Используемый показатель вероятности сохранения метрологической исправности  $P_{\text{исп}}(t)$  на момент времени  $t_i, i = 1, \dots, n$ , определяется выражением

$$P_{\text{исп}}(t) = P\{-S_{\text{доп}} \leq S(t_i) \leq S_{\text{доп}}\} = \frac{1}{2\pi\sigma_S(t_i)} \int_{-S_{\text{доп}}}^{S_{\text{доп}}} \exp\left(-\frac{[S - m_S(t_i)]^2}{2\sigma_S^2(t_i)}\right) dS, \quad (10)$$

где  $m_S(t_i), \sigma_S(t_i)$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение исследуемой МХ (как правило, погрешности) в момент времени метрологической поверки (контроля)  $t_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Графическое представление  $P_{\text{исп}}(t)$  отражено на рис. 3. Графически искомый показатель определяется как площадь под кривой плотности распределения вероятности МХ  $p(s)$ , ограниченной интервалами допуска  $[-S_{\text{доп}}; +S_{\text{доп}}]$ .

Расчет искомого показателя  $P_{\text{исп}}(t)$  по выражению (10) осуществляется по построенным математическим моделям изменения во времени МХ каждого из модулей. Показатель вероятности сохранения метрологической исправности рассчитывается по выражению (10) для соответствующих времени предстоящих поверок  $t_1, t_2, \dots, t_n$ .

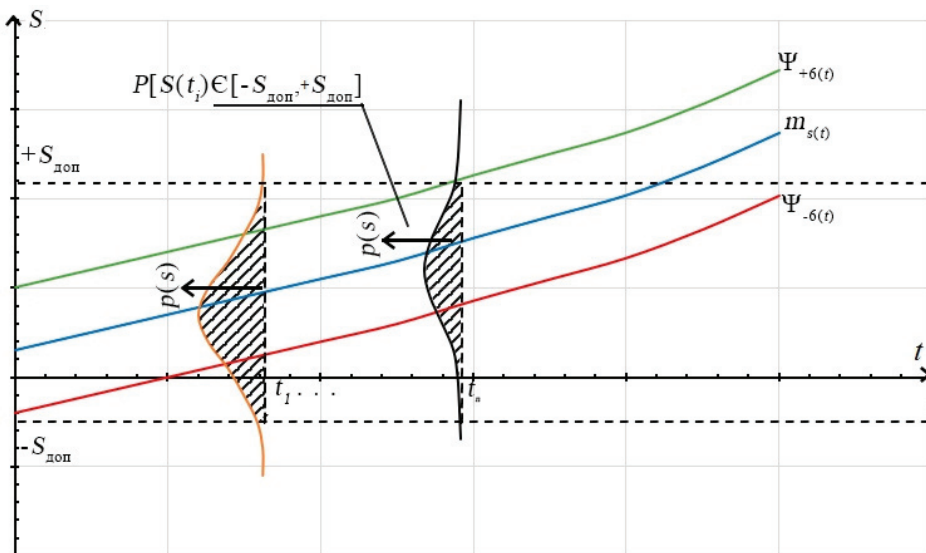


Рис. 3 Изменение во времени метрологической характеристики

## Алгоритмы оперативной оценки метрологической надежности по величине $P_{исп}(t)$

Для оперативного принятия решения о МН АЦП по уровню  $P_{исп}(t)$  на предстоящий интервал эксплуатации рассматриваемого измерительного средства можно использовать значения такого показателя с учетом доминирующего влияния основного модуля в структуре аналого-цифрового преобразователя. Выбор такого модуля проводится по минимальному из результатов расчета  $P_{исп}(t)$  для всех трех модулей для  $t=0$  – начало эксплуатации. На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма оперативной оценки МН по величине  $P_{исп}(t)$ .

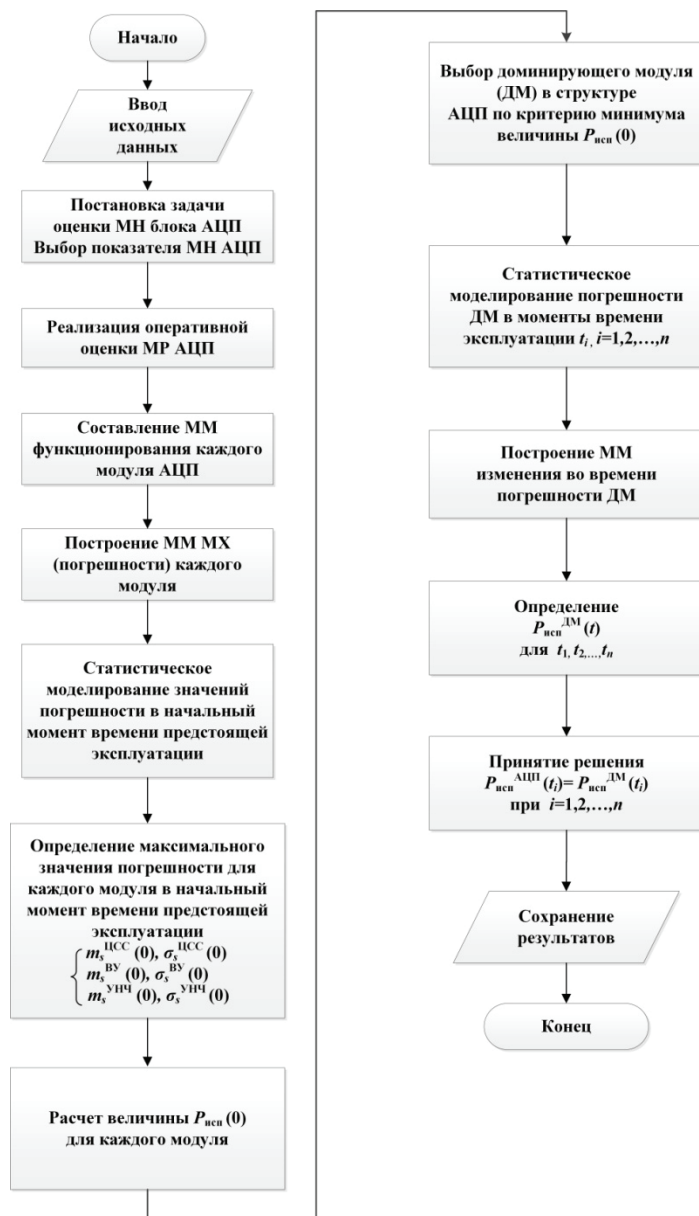


Рис. 4. Блок-схема методики оценки МН

Приведенная на рис. 4 блок-схема алгоритма оценки  $P_{\text{исп}}(t)$  аналого-цифрового преобразователя в структуре ИИС включает следующие этапы:

1. На основе проведенного сбора данных и анализа информации по техническому составу блока, его структурных, функциональных и принципиальных схем формируется база данных по параметрам элементов, входящих в состав модулей АЦП.

2. В соответствии с постановкой задачи по оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразования проводится выбор основного показателя МН – метрологической исправности  $P_{\text{исп}}(t)$ .

3. Осуществляется оценка метрологической исправности блока АЦП.

3.1. Строятся математические модели функционирования модулей, составляющих измерительный канал аналого-цифрового преобразователя: цепи дифференциальной нагрузки и согласования, нормализующего усилителя и устройства формирования частоты в соответствии с зависимостями вида (3), (5), (7).

3.2. На следующем этапе строятся математические модели МХ для составляющих блок АЦП модулей (4), (6), (8). В качестве исследуемых метрологических характеристик выбирается относительная погрешность соответствующего модуля.

3.3. Проводится статистическое моделирование значений погрешностей в начальный момент времени предстоящей эксплуатации согласно алгоритму, представленному в [1, 4, 5, 8]. В результате реализации статистического моделирования находятся значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения исследуемой МХ соответствующих модулей в структуре АЦП в начальный момент времени предстоящей эксплуатации.

3.4. С учетом заданной доверительной вероятности определяются значения погрешностей для каждого модуля в начальный момент времени предстоящей эксплуатации, при этом формируется база данных по значениям погрешности всех модулей блока АЦП, то есть

$$\max \left\{ \left( m_S^{\text{ЦСС}}(0) + 3\sigma_S^{\text{ЦСС}}(0) \right), \left( m_S^{\text{ВУ}}(0) + 3\sigma_S^{\text{ВУ}}(0) \right), \left( m_S^{\text{УНЧ}}(0) + 3\sigma_S^{\text{УНЧ}}(0) \right) \right\}, \quad (11)$$

где  $m_S^{\text{ЦСС}}(0)$ ,  $m_S^{\text{ВУ}}(0)$ ,  $m_S^{\text{УНЧ}}(0)$  – математические ожидания модуля цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно;  $\sigma_S^{\text{ЦСС}}(0)$ ,  $\sigma_S^{\text{ВУ}}(0)$ ,  $\sigma_S^{\text{УНЧ}}(0)$  – среднеквадратические отклонения модуля цепи согласования сигналов, выравнивающего усилителя, устройства настройки частоты соответственно.

3.5. По полученным в п. 3.4 значениям погрешностей рассчитываются величины  $P_{\text{исп}}^{\text{ЦСС}}(0)$ ,  $P_{\text{исп}}^{\text{УНЧ}}(0)$ ,  $P_{\text{исп}}^{\text{ВУ}}(0)$ , и выбирается в качестве доминирующего модуль, имеющий минимальное значение этого показателя, то есть  $\min \left\{ P_{\text{исп}}^{\text{ЦСС}}(0), P_{\text{исп}}^{\text{УНЧ}}(0), P_{\text{исп}}^{\text{ВУ}}(0) \right\}$ .

3.6. Для выбранного доминирующего модуля (ДМ) осуществляется статистическое моделирование нестационарного случайного процесса изменения во времени его погрешности. Базой данных для проведения моделирования являются значения параметров составляющих элементов и характер их изменения во времени его МХ – погрешности.

3.7. По полученным в п. 3.6 значениям характеристик исследуемой погрешности в различные моменты времени и при различных условиях эксплуатации строится математическая модель изменения во времени погрешности выбранного в п. 3.6 модуля.

3.8. С использованием аппарата аналитико-вероятностного прогнозирования и формулы вида (10) для оценки  $P_{\text{исп}}(t)$  определяется величина данного показателя для выбранного доминирующего модуля в моменты времени предстоящих проверок АЦП  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , при этом принимается  $P_{\text{исп}}^{\text{АЦП}}(t_i) = P_{\text{исп}}^{\text{ДМ}}(t_i), i = 1, 2, \dots, n$ .

### Заключение

Сформированная таким образом база данных по прогнозируемым значениям вероятности сохранения метрологической исправности АЦП позволяет не только получить информацию об уровне метрологической надежности в моменты времени проверок в процессе предстоящей эксплуатации, но и оперативно дать рекомендации по предстоящему метрологическому обслуживанию аналого-цифрового преобразователя и информационно-измерительной системы в целом.

#### Список литературы

1. Курносов, Р. Ю. Оценка погрешности программно-определяемой платформы в структуре информационно-измерительных систем / Р. Ю. Курносов, Т. И. Чернышова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 3(55). – С. 192 – 197. doi: 10.25699/SSSB.2024.55.3.026
2. Курносов, Р. Ю. Метрологический анализ измерительной процедуры цифровых средств измерений / Р. Ю. Курносов, Т. И. Чернышова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 375 – 382. doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.375-382
3. Чернышова, Т. И. Повышение показателей метрологической надежности при проектировании информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов, П. И. Карелин // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием, Тамбов, 07 мая 2024 г. – Тамбов, 2024. – С. 212 – 213.
4. Мищенко, С. В. Метрологическая надежность измерительных средств / С. В. Мищенко, Э. И. Цветков, Т. И. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2001. – 218 с.
5. Алексеев, В. В. Структуры и алгоритмы коррекции основной погрешности измерительного канала с использованием измеряемой величины / В. В. Алексеев, Е. О. Грубо, П. Г. Королев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 4(19). – С. 23 – 32.
6. Kurnosov, R. Yu. Methodology for Assessing Metrological Reliability Analog-To-digital Converter in the Structure Information and Measurement Systems / R. Yu. Kurnosov, T. I. Chernyshova, V. N. Chernyshov // Proceedings – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021 : 3, Lipetsk, 10–12 November 2021 year. 3rd International Conference. – Lipetsk, 2021. – P. 90 – 93. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632242
7. Кондрашкова, Г. А. Метрологический анализ систем измерения и управления: учебное пособие / Г. А. Кондрашкова, И. В. Бондаренкова, А. В. Черникова. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2017. – 134 с.
8. 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.

## Determining the Metrological Performance of Analog-to-Digital Conversion Unit in the Structure of Information-Measuring Systems

T. I. Chernyshova, R. Yu. Kurnosov✉, P. I. Karelin

*Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems,  
romankurnosov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** analytical and probabilistic forecasting method; analog-to-digital converter; information-measuring system; metrological serviceability; metrological reliability; metrological characteristic; metrological resource; error; measuring instruments.

**Abstract:** The article considers the determination of the metrological serviceability of the analog-to-digital conversion unit in the structure of information-measuring systems. The solution to the problem of assessing the metrological reliability (MR) of the analog-to-digital conversion (ADC) unit at the design stage is shown based on the use of the analytical and probabilistic forecasting method. The developed methodology for assessing the MR of the analog-to-digital conversion unit at the design stage allows for prompt assessment of the probability of maintaining the metrological serviceability of the ADC unit to solve the problem of assessing the metrological reliability of both the unit itself and the information-measuring system as a whole.

### References

1. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I. [Estimation of the error of a software-defined platform in the structure of information and measurement systems], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2024, no. 3(55), pp. 192-197, doi: 10.25699/SSSB.2024.55.3.026 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I. [Metrological analysis of the measurement procedure of digital measuring instruments], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 375-382, doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.375-382 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Chernyshova T.I., Kurnosov R.Yu., Karelin P.I. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. tr. IX Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem* [Radioelectronics. Problems and prospects of development: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation], Tambov, May 07, 2024, Tambov, 2024, pp. 212-213. (In Russ.)
4. Mishchenko S.V., Tsvetkov E.I., Chernyshova T.I. *Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv* [Metrological reliability of measuring instruments], Moscow: Mashinostroenie, 2001, 218 p. (In Russ.)
5. Alekseev V.V., Grubo E.O., Korolev P.G. [Structures and algorithms for correcting the basic error of the measuring channel using the measured value], *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific State University], 2010, no. 4(19), pp. 23-32. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I., Chernyshov V.N. Methodology for Assessing Metrological Reliability Analog-To-digital Converter in the Structure Information and Measurement Systems, *Proceedings – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*, SUMMA 2021:3, Lipetsk, November 10-12, 2021. 3rd International Conference, Lipetsk, 2021, pp. 90-93, doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632242
7. Kondrashkova G.A., Bondarenkova I.V., Chernikova A.V. *Metrologicheskii analiz sistem izmereniya i upravleniya: uchebnoye posobiye* [Metrological analysis of

measurement and control systems: a textbook], St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2017, 134 p. (In Russ.)

8. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli ob"yektov, protsedur i sredstv izmereniy. Metrologicheskij analiz. Metrologicheskij sintez* [Metrology. Models of objects, procedures, and measuring instruments. Metrological analysis. Metrological synthesis], St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Technical University "LETI", 2014, 293 p. (In Russ.)

---

### **Bestimmung der messtechnischen Integrität des Blocks der Analog-Digital-Umwandlung in der Struktur der Informations- und Messsysteme**

**Zusammenfassung:** Der Artikel untersucht die Bestimmung der metrologischen Brauchbarkeit einer Analog-Digital-Umwandlungseinheit im Aufbau von Informations- und Messsystemen. Die Lösung des Problems der Bewertung der metrologischen Zuverlässigkeit (MZ) eines Analog-Digital-Umwandlungsblocks (ADU) in der Entwurfsphase ist anhand der Verwendung einer analytisch-probabilistischen Prognosemethode gezeigt. Die entwickelte Methodik zur Bewertung des MZ des Analog-Digital-Umwandlungsblocks in der Entwurfsphase ermöglicht die sofortige Bewertung der Wahrscheinlichkeit der Aufrechterhaltung der messtechnischen Funktionsfähigkeit des ADU-Blocks, um das Problem der Bewertung der messtechnischen Zuverlässigkeit sowohl des Blocks selbst, als auch des IMS als Ganzes zu lösen.

---

### **Détermination de l'intégrité métrologique de l'unité de conversion analogique-numérique dans la structure des systèmes d'information et de mesure**

**Résumé:** Est considérée la définition de l'intégrité métrologique de l'unité de transformation analogique-numérique dans la structure des systèmes d'information et de mesure. La solution du problème d'évaluation de la fiabilité métrologique (FM) de l'unité de conversion analogique-numérique (CAN) au stade de la conception est illustrée en utilisant la méthode de prévision analytique et probabiliste. La méthodologie développée pour évaluer le FM de l'unité de conversion analogique-numérique au stade de sa conception permet d'évaluer rapidement la probabilité de maintenir l'intégrité métrologique de l'unité CAN afin de résoudre le problème de l'évaluation de la fiabilité métrologique de l'unité elle-même et de l'unité de transformation analogique-numérique dans son ensemble.

---

**Авторы:** *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Курнос Роман Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Карелин Павел Игоревич* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.