

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ПРОЦЕДУРЫ ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Р. Ю. Курносков, Т. И. Чернышова

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

**Ключевые слова:** аналого-цифровой преобразователь; информационно-измерительные и управляющие системы; метрологическая надежность; метрологический анализ; погрешность; цифровое средство измерений.

**Аннотация:** Рассмотрено применение метрологического анализа оценки процедуры аналого-цифрового преобразования в структуре информационно-измерительных и управляющих систем. Полученные математические выражения позволяют определить диапазон возможных значений погрешности результатов измерений при аналого-цифровом преобразовании.

---

### Введение

Современные цифровые средства измерений в структуре информационно-измерительных и управляющих систем (ИИиУС) в своем составе содержат блоки аналого-цифровых преобразований (АЦП), имеющие достаточно сложные структурную и схемную реализации [1 – 4].

Важная характеристика качества АЦП – метрологическая надежность (МН), определяемая уровнем метрологических характеристик, в том числе и одной из основных характеристик – погрешностью АЦП. Возможный путь для решения задачи оценки МН проектируемых АЦП, используемых в структуре ИИиУС, – применение метрологического анализа (МА), являющегося основным методом, составляющим аппарат математической метрологии [4 – 8]. Расчетный метрологический анализ можно разделить на следующие этапы:

- определение априорных знаний (АЗ) для проведения МА;
- создание уравнения измерений в операторной форме;
- переход к уравнению в аналитико-алгоритмической форме с обеспечением необходимого уровня детализации описания всех выполняемых процедур: дискретизации, квантования, масштабирования;
- вывод аналитического выражения, представляющего погрешность в виде функций неслучайных и случайных аргументов.

Основной этап проведения МА – наличие соответствующих АЗ в виде уравнений измерений и математических моделей объектов, условий и средств измерений. Математическая метрология является основным средством теоретического описания измерений, которое формирует формализованное описание процедуры измерений на основе АЗ, проводит систематизацию измерений для обеспечения возможности проведения исследования измерений от простых к сложным, а также обеспечивает возможность создания взаимосвязанного МА и метрологического синтеза. Рассматриваемый в [2, 9] расчетный МА понимает под собой аналитиче-

ский расчет характеристик погрешностей измерения на основе формализовано заданных АЗ

$$AZ = (\lambda = F\gamma(t), M_\gamma, M_Y, \lambda_j^* = R_i, \dots, R_1\gamma_j(t), \{M_{ui}\}_{i=1}^m), \quad (1)$$

где  $M_\gamma$  – математические модели объекта измерений;  $M_Y$  – условия проведения измерений;  $L\gamma_j(t)$  – процедура измерений;  $\{M_{ui}\}_{i=1}^m$  – средства измерений.

Математические модели (ММ) объектов, условий и средств измерений представляются упорядоченными совокупностями (кортежами) параметров  $\{\alpha_s\}$  и отношений  $\{P_n\}$

$$MM_0 = (\{\alpha_s\}, \{\phi(\bar{\alpha}_1)\}, \{P_n\}), \quad (2)$$

где  $\{\alpha_s\}$  – кортеж параметров;  $\{\phi(\bar{\alpha}_1)\}$  – зависимости этих параметров;  $\{P_n\}$  – необходимые для проведения анализа взаимосвязи входящих в ММ элементов.

Необходимые и достаточные для оценивания основных характеристик погрешностей сведения о постоянном входном воздействии  $y$  представляются моделью

$$MM_\gamma := (\gamma_j(t) = \gamma_j, \gamma_j \in [\gamma_{\min}, \gamma_{\max}], w(\gamma_j)), \quad (3)$$

где  $\gamma_j(t)$  – входное воздействие на интервале  $j$ -го измерительного эксперимента;  $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$  – диапазон входных значений;  $w(\gamma_j)$  – плотность распределения вероятности.

В более сложных случаях, когда гипотеза о том, что  $\gamma_j(t) = \gamma_j$  (постоянно на интервале  $j$ -го эксперимента) несправедлива – данные сведения, продолжая оставаться необходимыми, перестают быть достаточными, так как при метрологическом анализе основных характеристик погрешностей могут потребоваться знания корреляционной функции  $B_\gamma(t, t')$ , условного распределения вероятности  $w(\gamma_j(t)/\gamma_j(t-\tau))$  и др.

Аналогично для математических моделей измерительного канала блока АЦП необходимыми являются сведения о виде преобразования, динамическом диапазоне и нормальных условиях использования. Соответствующая ММ записывается следующим образом:

$$MM_{R_i} = (R_i\phi_{ij}(t), \phi_{ij}[\phi_{i\min}, \phi_{i\max}] \overline{Y_{in}}), \quad (4)$$

где  $R_i\phi_{ij}(t)$  – результат  $i$ -го преобразования;  $\phi_{ij}(t) = R_{i-1}, \dots, R_1\gamma_j(t)$  – входное воздействие для  $i$ -го измерительного модуля;  $[\phi_{i\min}, \phi_{i\max}]$  – динамический диапазон  $z$ -го модуля;  $\overline{Y_{in}}$  – многомерная характеристика области нормальных условий использования  $i$ -го модуля.

Относительно рассматриваемой специфической проблемы вычислительного МА требуется дополнительная информация о свойствах случайных параметров, в виде зависимостей характеристик модуля от условий и т. д.

На основании вышеизложенного, последовательность сопоставления, представляющая собой процедуру МА, может быть показана следующим образом:

$$AZ = (\lambda = F\gamma(t), M_\gamma, M_Y, \lambda_j^* = R_i, \dots, R_1\gamma_j(t), \{M_{ui}\}_{i=1}^m) \rightarrow \\ \rightarrow \Delta\lambda_j^* = F_{1\Delta}(\{\alpha_s\}_{s=1}^{s'_{\alpha 1}}, \{\alpha_s\}_{s=s'_{\alpha 1}+1}^{s_{\alpha 1}}, \lambda_j) \rightarrow w(\Delta\lambda_j^*) \rightarrow \Theta^*(\Delta\lambda_j^*) = F_\Theta(\{\alpha_s\}_{s=s'_{\alpha 1}+1}^{s_{\alpha 1}}), \quad (5)$$

где  $F$  – вид функциональной связи измеряемой величины  $\lambda$  и входного воздействия  $\gamma$ ;  $\{\alpha_s\}_{s=1}^{s_{\alpha 1}}$  и  $\{\alpha_s\}_{s=s'_{\alpha}+1}^{s_{\alpha 1}}$  – соответственно неслучайные и случайные аргументы в выражении для погрешности  $\Delta\lambda_j^*$ ;  $M_\gamma, M_Y$  – математические модели входного воздействия и условий измерений соответственно;  $\Theta^*(\Delta\lambda_j^*)$  – характеристика погрешности результата измерения;  $M_{ii}$  – средства измерений;  $\lambda_j^*$  – результат измерения;  $\Delta\lambda_j^*$  – погрешность результата измерения;  $w(\Delta\lambda_j^*)$  – плотность распределения вероятности;  $\langle R_i(\cdot) \rangle_{q1j}$  – числовой результат, получаемый после  $i$ -го измерительного преобразования.

Выражение (5) представляет собой априорные знания для проведения МА рассматриваемого аналого-цифрового преобразования.

### Построение аналитических зависимостей

Используя основные принципы [2], становится возможным построение аналитических зависимостей, описывающих алгоритм основных преобразований в АЦП. Такими преобразованиями является масштабирование, квантование и дискретизация.

Процесс преобразования включает в себя следующие основные этапы: дискретизация измеряемой величины по времени, квантование ее по уровню и цифровое кодирование (рис. 1) [1, 10].

Уравнение измерений для блока АЦП имеет вид

$$u_j^* = R_{сч} R_M R_K R_D u_j^*(t), \quad (6)$$

где  $R_{сч}$ ,  $R_M$ ,  $R_K$ ,  $R_D$  – операторы считывания, масштабирования, квантования, дискретизации соответственно;  $u_j^*$  – результат измерения величины входного сигнала  $u_j$ .

Аналого-цифровое преобразование выступает в качестве измерительной процедуры, содержащей необходимый минимум измерительных преобразований,



**Рис. 1. Основные этапы преобразования:**

$n_q$  – число уровней квантований;  $y_{\max}$ ,  $y_{\min}$  – максимальное и минимальное значения сигнала соответственно;  $T_d$  – период дискретизации

что позволяет определить ее как простейшую. Измерительный модуль, реализующий простейшую измерительную процедуру, принято называть аналого-цифровым преобразователем. С учетом состава входящих в состав АЦП преобразований (дискретизация, квантование и масштабирование) уравнение измерений в операторной форме примет вид

$$u_j^* = R_M R_K R_D u_j^*(t). \quad (7)$$

Согласно уравнению (6), с учетом значений идеального интервала квантования  $(\Delta_K^u)$  и сдвига результата во времени на интервале  $t_{сд}$ , объектом метрологического анализа выступает процедура вида

$$u_j^* = \left\langle \left\langle [u_j(t)]_{(\Delta_K^u)}^h \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \Delta_K^u \right\rangle_{q_{2j}} \right\rangle_{q_{3j}} I(t - t_j - \Delta t_{сд}), \quad (8)$$

где  $q_{1j}, q_{2j}, q_{3j}$  – параметры округления результатов;  $h(t, t')$  – импульсная переходная характеристика;  $t_{сд}$  – сдвиг результата во времени на интервале,

$$I(x) \begin{cases} 1, & \text{при } x > 0; \\ 0, & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

*Цель измерения* – получение результата с установленной точностью, то есть с погрешностью, характеризующей отличие получаемого результата от истинного значения величины. Так как истинное значение величины не может быть определено с помощью технических средств, то и истинное значение погрешности установить невозможно. Исходя из того, что истинное значение произвольной измеряемой величины –  $\lambda$ , а результат измерений –  $\lambda^*$ , погрешность  $\Delta\lambda^* = \lambda^* - \lambda$ , можно записать выражение вида

$$\Delta\lambda_j^* = R_m, \dots, R_1 \gamma_j(t) - R_m^\Gamma, \dots, R_1^\Gamma \gamma_j(t), \quad (9)$$

где  $\Delta\lambda_j^*$  – полная погрешность;  $R(\cdot)$  – оператор, представляющий  $i$ -е измерительное преобразование;  $R^\Gamma(\cdot)$  – оператор, представляющий гипотетическое измерительное преобразование;  $\gamma_j(t)$  – входное воздействие – носитель информации о значении измеряемой величины  $\lambda_j$ .

Подобное представление погрешности позволяет разложить ее на компоненты, каждый из которых обусловлен одним из элементарных измерительных преобразований, обеспечивая при этом выполнение условия

$$\Delta\lambda_j^* = \sum_{i=1}^m \Delta_i \lambda_j^*, \quad (10)$$

где  $\Delta_i \lambda_j^*$  – составляющая полной погрешности, обусловленная  $i$ -м элементарным измерительным преобразованием;  $m$  – число таких преобразований. Разложения полной погрешности на  $m$  компонентов имеет вид

$$\Delta_i \lambda_j^* = R_m^\Gamma, \dots, R_{i+1}^\Gamma R_i, \dots, R_1 \gamma_j(t) - R_m^\Gamma, \dots, R_i^\Gamma R_{i-1}, \dots, R_1 \gamma_j(t). \quad (11)$$

Оценить погрешность результатов измерений и ее характеристики можно теоретически и экспериментально. Теоретическое определение погрешности и ее характеристик с помощью аналитического описания может быть представлено выражением

$$\Delta^* \lambda_j^* = f \left[ \{ \alpha_s \}_{s=1}^{s'_\alpha}, \{ \alpha_s \}_{s=s'_\alpha+1}^{s_\alpha} \right] - \lambda_j = f_\Delta \left[ \{ \alpha_s \}_{s=1}^{s'_\alpha}, \{ \alpha_s \}_{s=s'_\alpha+1}^{s_\alpha}, \lambda_j \right], \quad (12)$$

где  $f$  – функция случайных аргументов.

Вид  $f(\cdot)$  определяется видом уравнения измерений, свойствами входного воздействия  $\gamma_j$  и условиями измерений. Неслучайные и случайные аргументы определяются моделями входного воздействия, измерительными модулями и условиями измерений.

Выражение (12) на основании (11) можно представить в следующем виде:

$$\Delta_i \lambda_j^* = f_{\Delta i} \left[ \{ \alpha_s \}_{s=1}^{s'_\alpha}, \{ \alpha_s \}_{s=1+s'_\alpha}^{s_\alpha} \right]. \quad (13)$$

Рассмотрим уравнение измерения аналого-цифрового преобразования [1] вида

$$u_j^* = \left\langle \left\langle [a_j u_j]_{\Delta_K^H}^h \right\rangle \left\langle \Delta_K^H u / a_H \right\rangle \right\rangle = [a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_d})] / a_H + \Delta_K u_j^*. \quad (14)$$

Для этого случая выражение погрешности можно представить следующим образом:

$$\Delta u_j^* = a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_d}) / a_H + \Delta_K u_j^* - u_j = (\Delta a_j - a_j e^{-\alpha \Delta t_d}) u_j / a_H + \Delta_K u_j^*, \quad (15)$$

где  $a_j$  и  $a_H$  – реализуемый и номинальный коэффициенты масштабирования (нормализации) соответственно;  $u_j$  – истинное значение измеряемой величины;  $\alpha$ ,  $\Delta t_d$  – параметры дискретизации.

Необходимо отметить, что параметры  $a_j$ ,  $a_H$ ,  $\alpha$ ,  $\Delta t_d$  входят в состав моделей указанных выше измерительных модулей;  $u_j$  – параметр, характеризующий входное воздействие;  $\Delta_K u_j^*$  – погрешность квантования.

В данном случае полная погрешность включает в себя три компоненты

$$\Delta u_j^* = \Delta_a u_j^* + \Delta_d u_j^* + \Delta_K u_j^*, \quad (16)$$

где  $\Delta_a u_j^* = a_j u_j / a_H - u_j = \Delta a_j u_j / a_H$  – погрешность из-за отличия реализуемого коэффициента масштабирования (нормализации)  $a_j$  от номинального  $a_H$  ( $\Delta a_j = a_j - a_H$ );  $\Delta_d u_j^* = a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_d}) / a_H - a_j u_j / a_H = e^{-\alpha \Delta t_d} a_j u_j / a_H$  – погрешность из-за отличия дискретизации от гипотетической;  $\Delta_K u_j^* = E [a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_d}) / \Delta_K^H u + 1/2] \Delta_K^H u / a_H - a_j u_j (1 - e^{-\alpha \Delta t_d}) / a_H$  – погрешность из-за отличия идеального равномерного квантования от гипотетического.

### Заключение

Полученные выражения (12) и (13) позволяют определить диапазон возможных значений погрешности результатов измерений при аналого-цифровом преобразовании и, используя приемы аналитико-вероятностного прогнозирования, ле-

жащего в основе метода оценки МН, построить математическую модель изменения во времени исследуемой метрологической характеристики и, в конечном итоге, найти один из основных показателей метрологической надежности – величину метрологического ресурса. Таким образом, проведенное с использованием методологии метрологического анализа получение аналитического описания для исследуемой погрешности цифровых средств измерений с учетом реализуемых в рассматриваемом блоке АЦП функциональных преобразований входного сигнала позволяет в дальнейшем оценить метрологическую надежность проектируемого блока.

#### *Список литературы*

1. 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.

2. Курносов, Р. Ю. Метрологический анализ измерительной процедуры аналого-цифрового преобразования в информационно-измерительных системах при оценке их метрологической надежности / Р. Ю. Курносов, Т. И. Чернышова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 25 – 32. doi: 10.21685/2307-5538-2020-3-3

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/vestnik.2017.02.pp.209-215

4. Чернышова, Т. И. Информационно-аналитическая система оценки и прогнозирования метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № S2 (52). – С. 112 – 114.

5. Кондрашкова, Г. А. Метрологический анализ систем измерения и управления : учеб. изд. / Г. А. Кондрашкова, И. В. Бондаренкова, А. В. Черникова. – СПб. : Санкт-Петербургский гос. ун-т промышленных технологий и дизайна, 2017. – 134 с.

6. Курносов, Р. Ю. Оценка погрешности аналого-цифрового преобразования в информационно-измерительных системах / Р. Ю. Курносов // Южно-Сибирский науч. вестн. – 2020. – № 6 (34). – С. 155 – 162.

7. Kurnosov, R. Yu. Improving Metrological Reliability of Information-Measuring Systems Using Mathematical Modeling of Their Metrological Characteristics / R. Yu. Kurnosov, T. I. Chernyshova, V. N. Chernyshov // International Conference on Information Technologiess in Business and Industry 2018, ITBI 2018 17 – 20 января 2018 г., Tomsk. – Великобритания, 2018. – Vol. 1015. – P. 032077. doi:10.1088/1742-6596/1015/3/032077.

8. Metrological Analysis of Analog-To-Digital Conversion Measurement Procedure in Information-Measuring and Control Systems / R. Yu. Kurnosov, T. I. Chernyshova, V. N. Chernyshov, M. A. Kamenskaya // Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020, Virtual, 10 – 13 ноября 2020 г., Lipetsk. – США, 2020. – P. 61 – 64. 9280766.

9. 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, 10 – 12 ноября 2021 г., Lipetsk. – США, 2021. – P. 90 – 93. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632242

10. Мищенко, С. В. Метрологическая надежность измерительных средств / С. В. Мищенко, Э. И. Цветков, Т. И. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2001. – 218 с.

---

## Metrological Analysis of the Measurement Procedure for Digital Measuring Instruments

R. Yu. Kurnosov, T. I. Chernyshova

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

**Keywords:** analog-to-digital converter; information-measuring and control systems; metrological reliability; metrological analysis; error; digital measuring instrument.

**Abstract:** The application of metrological analysis for assessing the analog-to-digital conversion procedure in the structure of information-measuring and control systems is considered. The resulting mathematical expressions make it possible to determine the range of possible error values of measurement results during analog-to-digital conversion.

### References

1. 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: Izdatel'stvo SPbGETU «LETI», 2014, 293 p. (In Russ.)
2. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I. [Metrological analysis of the measuring procedure of analog-to-digital conversion in information-measuring systems in assessing their metrological reliability], *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Control. Control], 2020, no. 3 (33), pp. 25-32. doi: 10.21685/2307-5538-2020-3-3 (In Russ., abstract in Eng.)
3. 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.)
4. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Information-analytical system for assessing and predicting the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, № S2 (52), pp. 112-114. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Kondrashkova G.A., Bondarenkova I.V., Chernikova A.V. *Metrologicheskij analiz sistem izmereniya i upravleniya: uchebnoye izdaniye* [Metrological analysis of measurement and control systems: educational publication], St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet promyshlennykh tekhnologiy i dizayna, 2017, 134 p. (In Russ.)
6. Kurnosov R.Yu. [Evaluation of the error of analog-to-digital conversion in information-measuring systems], *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2020, no. 6 (34), pp. 155-162.

7. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I., Chernyshov V.N. Improving Metrological Reliability of Information-Measuring Systems Using Mathematical Modeling of Their Metrological Characteristics, Proceedings of the International Conference on Information Technologiess in Business and Industry 2018, ITBI 2018, 17 - 20 January, 2018, Tomsk, Great Britain, 2018, vol. 1015, p. 032077, doi:10.1088/1742-6596/1015/3/032077.

8. Kurnosov R.Yu., Chernyshova T.I., Chernyshov V.N., Kamenskaya M.A. Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020, Virtual, 10-13 November, 2020, Lipetsk, USA, 2020, pp. 61-64. 9280766.

9. 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, 10 - 12 November, 2021, Lipetsk, USA, 2021, pp. 90-93, doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632242

10. Mishchenko S.V., Tsvetkov E.I., Chernyshova T.I. *Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv* [Metrological reliability of measuring instruments], Moscow: Mashinostroyeniye, 2001, 218 p. (In Russ.)

---

### **Metrologische Analyse von Messverfahren der digitalen Messgeräte**

**Zusammenfassung:** Es ist die Anwendung der messtechnischen Analyse zur Bewertung des Analog-Digital-Umwandlungsverfahrens im Aufbau von Informationsmess- und Steuerungssystemen betrachtet. Die erhaltenen mathematischen Ausdrücke ermöglichen es, den Bereich möglicher Fehlerwerte von Messergebnissen bei der Analog-Digital-Wandlung zu bestimmen.

---

### **Analyse métrologique de la procédure de mesure des moyens de mesure numériques**

**Résumé:** Est examinée l'application de l'analyse métrologique de l'évaluation de la procédure de la transformation analogique-numérique dans la structure des systèmes d'information et de mesure et de contrôle. Les expressions mathématiques obtenues permettent de déterminer la plage des valeurs possibles d'erreur des résultats de mesure lors de la conversion analogique-numérique.

---

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