

## Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.3.088.2

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-52-58

### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ СИНХРОСИГНАЛА В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Кирилл Александрович Батенков<sup>1</sup>, Олег Николаевич Катков<sup>2</sup>,  
Андрей Владимирович Козленко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Академия ФСО России, г. Орел, Россия

<sup>3</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> [pustur@yandex.ru](mailto:pustur@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

<sup>2</sup> [katkov\\_orel@list.ru](mailto:katkov_orel@list.ru)

<sup>3</sup> [tichars@yandex.ru](mailto:tichars@yandex.ru)

**Аннотация.** Целью исследования является обобщение подходов к анализу погрешности фазовых флуктуаций синхросигнала в системах передачи информации. Задачей является уточнение методического аппарата расчета погрешности времени и частоты. Методы исследования: сравнительный анализ в сочетании с анализом отечественных стандартов и зарубежных рекомендаций, касающихся измерению неточности синхросигнала вследствие воздействия помех и шумов в цифровых каналах связи. Представлены основные расчетные соотношения для показателей неточности сигналов эталонных генераторов. На примерах показан порядок их расчета и анализа, а также порядок определения соответствия нормам. Представлены параметры погрешности частоты: девиация Аллана, модифицированная девиация Аллана, девиация времени, среднеквадратическое значение погрешности интервала времени, максимальная погрешность интервала времени, а также параметр погрешности частоты: относительное отклонение частоты за время более 7 суток синхросигналов на выходах первичных эталонных генераторов. Выводы: оценка соответствия нормам стабильности частоты синхросигнала осуществляется для четырех типов смещения частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты: режим свободных колебаний, минимальная полоса статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств.

**Ключевые слова:** синхросигнал, цифровая система передачи, погрешность времени, погрешность частоты

**Для цитирования:** Батенков К.А., Катков О.Н., Козленко А.В. Анализ погрешности времени и частоты синхросигнала в цифровых системах передачи // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 52-58. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-52-58.

Original article

Open Access Article

### ANALYSIS OF TIME AND FREQUENCY ERROR OF SYNCHRONIZATION SIGNALS IN DIGITAL TRANSMISSION SYSTEMS

Kirill A. Batenkov<sup>1</sup>, Oleg N. Katkov<sup>2</sup>, Andrey V. Kozlenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Orel, Russia

<sup>3</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>1</sup> [pustur@yandex.ru](mailto:pustur@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

<sup>2</sup> [katkov\\_orel@list.ru](mailto:katkov_orel@list.ru)

<sup>3</sup> [tichars@yandex.ru](mailto:tichars@yandex.ru)

**Abstract.** *The aim of this study is to generalize approaches to analyzing the error of phase fluctuations of the synchronization signal in information transmission systems. The objective is to refine the methodological framework for calculating time and frequency error. The research methods include comparative analysis combined with an analysis of domestic standards and international recommendations related to measuring synchronization signal inaccuracy due to the influence of interference and noise in digital communication channels. The work presents the main calculation relationships for the inaccuracy indicators of reference generator signals. Examples illustrate the procedure for their calculation and analysis, as well as the process for determining compliance with standards. The presented parameters of frequency error include Allan deviation, modified Allan deviation, time deviation, root mean square (RMS) of time interval error, maximum time interval error, and the frequency error parameter: relative frequency deviation over a period longer than 7 days for synchronization signals at the outputs of primary reference generators. Findings state that the assessment of compliance with frequency stability standards of the synchronization signal is performed for four types of frequency offset of the input reference signal from the nominal frequency: free-running mode, minimum static tracking range, dynamic tracking range, and capture range of the slave devices.*

**Keywords:** synchronization signal, digital transmission system, time error, frequency error

**For citation:** Batenkov K.A., Katkov O.N., Kozlenko A.V. Analysis of Time and Frequency Error of Synchronization Signals in Digital Transmission Systems. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 52-58. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-52-58.

## Введение

Поскольку непрерывное значение функции погрешности времени  $x(t)$  практически неизмеримо, то рассматривают последовательность эквидистантных отсчетов:

$$x_i = x[t_0 + (i - 1)\tau_0], i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $t_0$  – момент начала измерений,  $\tau_0$  – временной интервал между соседними отсчетами (дискретизации).

Так как производной в непрерывном времени соответствует оператор разности в дискретном [1], то отсчеты относительного отклонения частоты:

$$y_i = \frac{|x_{i+1} - x_i|}{\tau_0}, i = 1, 2, \dots, N - 1.$$

Соответственно период измерений  $\tau$  содержит целое число  $n$  отсчетов, т.е.  $\tau = n\tau_0$ . Тогда погрешность частоты:

$$y_m = \max_i y_i, i = 1, 2, \dots, N - 1.$$

## Характеристики фазовой автоматической подстройкой частоты

Предельные значения частоты для систем с фазовой автоматической подстройкой частоты описываются четырьмя основными характеристиками: полоса статического слежения, полоса динамического слежения, полоса синхронизации, полоса захвата [1].

Взаимосвязь отсчетов функции времени  $T_i$ , полной (обобщенной) мгновенной фазы  $\Phi_i$ , времени эталонного генератора  $T_{r,i}$  и погрешности времени  $x_i$  имеют вид:

$$T_i = \frac{\Phi_i}{2\pi\nu_0}.$$

$$x_i = T_i - T_{r,i}.$$

*Полоса статического слежения (hold-in range)* – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство продолжает оставаться в режиме синхронизации при медленном изменении частоты во всем диапазоне частот. Таким образом в полосе статического слежения устройство способно отслеживать медленные (квазистационарные) вариации частоты синхросигнала.

*Полоса динамического слежения (pull-out range)* – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство продолжает оставаться в режиме синхронизации, а за пределами которой нет, независимо от скорости изменения частоты. Таким образом в полосе динамического слежения устройство способно отслеживать быстрые скачки частоты синхросигнала.

*Полоса синхронизации (lock-in range)* – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство быстро переходит на новую частоту синхронизации.

*Полоса захвата (pull-in range)* – наибольшее смещение частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты, в пределах которого ведомое устройство переходит в режим синхронизации независимо от скорости захвата входного сигнала.

### Характеристики погрешности частоты

Все четыре вышеприведенные характеристики описываются на основе параметра погрешности частоты  $y_m$ , т.е. в относительных единицах, не смотря на то, что определения даны в абсолютных.

Девияция Аллана  $d_A$  (*Allan deviation*) рассчитывается на основе пары отчетов частоты или тройки отчетов времени [2]:

$$d_A = \sqrt{\frac{1}{2n^2\tau_0^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2}, n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor.$$

Слабая различительная способность дисперсии Аллана относительно белого шума и фазового фликкер-шума привела к использованию модифицированной девияции Аллана  $d_{A'}$  (*modified Allan deviation*) [1]. Модифицированная дисперсия отличается от основной дополнительным усреднением по  $n$  соседним измерениям [2]:

$$d_{A'} = \sqrt{\frac{1}{2n^4\tau_0^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[ \sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}, n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor.$$

Девияция Аллана и модифицированная девияция Аллана безразмерны, поскольку являются показателями стабильности относительной частоты [1]. Для непосредственной оценки стабильности времени введена девияция времени  $d_t$  (*TDEV – time deviation*), связанная с модифицированной девией Аллана:

$$d_t = \frac{n\tau_0}{\sqrt{3}} d_{A'} = \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[ \sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}, n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor.$$

Среднеквадратическое значение погрешности интервала времени (root mean square time interval error):

$$d_r = \sqrt{\frac{1}{N-n} \sum_{j=1}^{N-n} (x_{i+n} - x_i)^2}, n = 1, 2, \dots, N - 1.$$

Максимальная погрешность интервала времени (*MTIE – maximum time interval error*) – максимальный размах изменения задержки сигнала синхронизации по отношению к эталонному за интервал наблюдения  $\tau = n\tau_0$  для всех подобных интервалов в течение периода измерения  $T = (N - 1)\tau_0$  (рис. 1):

$$m_x = \max_{1 \leq k \leq N-n} \left( \max_{k \leq i \leq k+n} x_i - \min_{k \leq i \leq k+n} x_i \right), n = 1, 2, \dots, N - 1.$$

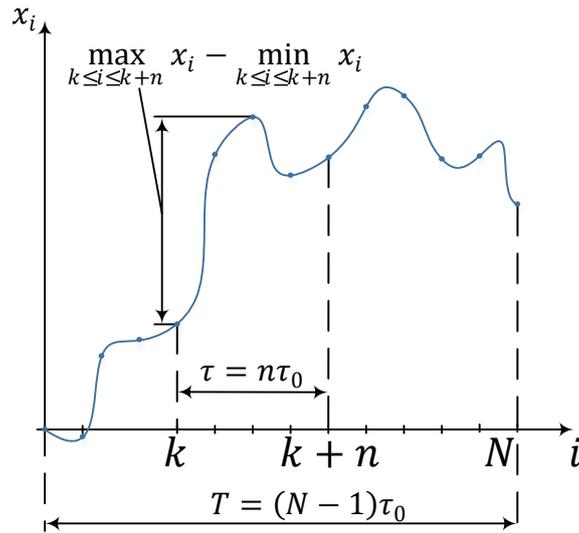


Рис. 1. Пример графика отсчетов погрешности времени  
*Fig. 1. Example of time error graphs*

Поскольку флуктуации фазы произвольны, например, могут соответствовать модели гауссового распределения, то значения отсчетов погрешности времени  $x_i$  способны принимать значения, стремящиеся к бесконечности, пусть и маловероятные [1]. Таким образом, измеренные значения максимальной погрешности интервала времени  $m_x$  зависят не только от интервала наблюдения  $\tau = n\tau_0$ , но и от периода измерения  $T = (N - 1)\tau_0$ , хотя и в меньшей степени. Кроме того, одно измерение максимальной погрешности интервала времени  $m_x$  по единственной реализации случайного процесса отсчетов погрешности времени  $x_i$  на данном периоде измерения  $T$  констатирует лишь конкретный результат эксперимента, что не позволяет его использовать для строгой оценки качества синхросигнала.

Оценка максимальной погрешности интервала времени и соответствующий уровень статистической достоверности рассчитывается на основе данных, полученных на различных интервалах измерения. Так, обозначив за  $X_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$  набор независимых измеренных величин максимальной погрешности интервала времени при заданном интервале наблюдения  $\tau$  для  $M$  периодов измерения длительностью  $T$  каждый. Упорядочив по возрастанию значения максимальной погрешности интервала времени  $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_M$  и обозначив  $x_\beta$  квантиль порядка  $\beta$  случайной величины  $X$ , рассчитывается как вероятность того, что  $x_\beta$  попадает в интервал между отсчетами  $X_i$  и  $X_j$ :

$$P(X_i \leq x_\beta \leq X_j) = \sum_{k=i}^{j-1} C_M^k \beta^k (1 - \beta)^{M-k}, i < j, i, j = 1, 2, \dots, M.$$

где  $P(A)$  – вероятность события  $A$ ;  $C_M^k = \frac{M!}{k!(M-k)!}$  – биномиальный коэффициент.

### Погрешность времени

Основным параметром, подлежащим эксплуатационному контролю при техническом обслуживании первичных эталонных генераторов PRC и требующим специального метрологического обеспечения, является погрешность частоты (относительное отклонение частоты за время более 7 суток) синхросигналов на выходах первичных эталонных генераторов [3].

В режиме свободных колебаний погрешность частоты выходного синхросигнала различных видов генераторов не должна превышать значений, приведенных в табл. 1, в течение заданного периода измерений [4 – 8].

Таблица 1

## Нормы погрешности частоты синхросигнала

Table 1

*Standards for clock signal frequency error*

Уровень иерархии	Вид генератора	Максимальная погрешность частоты	Период измерений
Первичный эталонный генератор PRC	Стандартный	$10^{-11}$	7 сут.
	Улучшенный	$10^{-12}$	7 сут.
Вторичный задающий генератор	Тип I	–	–
	Тип II	$1,6 \cdot 10^{-8}$	1 год
	Тип III	$4,6 \cdot 10^{-6}$	1 год
	Тип IV	$4,6 \cdot 10^{-6}$	1 год
	Тип V	–	–
	Тип VI	–	–
Генератор сетевого элемента	Вариант 1	$4,6 \cdot 10^{-6}$	1 мес., 1 год
	Вариант 2	$2 \cdot 10^{-5}$	1 мес., 1 год

Минимальные полосы статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств должны соответствовать табл. 2, независимо от смещения частоты внутреннего генератора [6, 7, 9].

Таблица 2

## Минимальные полосы статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств

Table 2

*Minimum static tracking, dynamic tracking and slave acquisition bandwidths*

Уровень иерархии	Тип генератора	Полоса захвата	Полоса статического слежения	Полоса динамического слежения
Вторичный задающий генератор	Тип I	$10^{-8}$	–	–
	Тип II	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	–
	Тип III	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	–
	Тип IV	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	–
	Тип V	–	–	–
	Тип VI	–	–	–
Генератор сетевого элемента	Вариант 1	$4,6 \cdot 10^{-6}$	–	$4,6 \cdot 10^{-6}$
	Вариант 2	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	–

## Анализ погрешности времени

*Пример 1.* Измеренные на частоте дискретизации 10 МГц значения фазы гармонического синхросигнала с частотой 2,048 МГц следующие: 1,286796423; 2,573595597; 3,860397647; 5,147192479; 0,150805658; 1,437593734; 2,724389916; 4,011189339; 5,297987002; 0,301594302.

Определить соответствие характеристик синхросигнала параметрам погрешности частоты генераторов.

Дано:  $f_d = 10$  МГц,  $\nu_0 = 2,048$  МГц,  $\Phi'_1 = 1,286796423$ ;  $\Phi'_2 = 2,573595597$ ;  $\Phi'_3 = 3,860397647$ ;  $\Phi'_4 = 5,147192479$ ;  $\Phi'_5 = 0,150805658$ ;  $\Phi'_6 = 1,437593734$ ;  $\Phi'_7 = 2,724389916$ ;  $\Phi'_8 = 4,011189339$ ;  $\Phi'_9 = 5,297987002$ ;  $\Phi'_{10} = 0,301594302$ .

Найти:  $u_m$ .

Измеренные значения фазы находятся в диапазоне от 0 до  $2\pi$ , т.е.  $\Phi'_i \in [0; 2\pi)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 10$ . Поэтому для нахождения реального времени тактового генератора необходимо их привести к возрастающему виду:

$$\Phi_1 = \Phi'_1, \Phi_i = \begin{cases} \Phi'_i + 2\pi \left[ \frac{\Phi_{i-1}}{2\pi} \right], & \Phi'_i \leq \Phi'_{i+1}, \\ \Phi'_i + 2\pi \left[ \frac{\Phi_{i-1}}{2\pi} \right], & \Phi'_i > \Phi'_{i+1}, \end{cases} \quad i = 2, 3, \dots, 10.$$

Рассчитанные значения полной фазы приведены в табл. 3. Отсчеты функции времени (см. табл. 3):

$$T_i = \frac{\Phi_i}{2\pi\nu_0}; T_1 = \frac{1,286796423}{2\pi \cdot 2,048} = 0,1000000056 \text{ (мкс)}.$$

Отсчеты функции времени эталонного генератора (см. табл. 3):

$$T_{r,i} = \frac{i}{f_d}; T_{r,1} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ (мкс)}.$$

Отсчеты погрешности времени (см. табл. 3):

$$x_i = T_i - T_{r,i}; x_1 = 0,1000000056 - 0,1 = 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ (мкс)}.$$

Отсчеты относительного отклонения частоты (см. табл. 3):

$$y_i = \frac{|x_{i+1} - x_i|}{\tau_0} = f_d |x_{i+1} - x_i|; y_1 = 10 \cdot |2,3 \cdot 10^{-7} - 5,6 \cdot 10^{-9}| = 2,2 \cdot 10^{-6}.$$

Тогда погрешность частоты (см. табл. 3):

$$y_m = \max_i y_i = 6,4 \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, погрешность частоты синхросигнала соответствует только нормам для генератора сетевого элемента (вариант 2) (табл. 1), а также для его полос захвата и статического слежения (табл. 2).

Таблица 3

Параметры синхросигнала

Table 3

*Clock parameters*

$i$	$\Phi'_i$	$\Phi_i$	$T_i$ , мкс	$T_{r,i}$ , мкс	$x_i$ , пс	$y_i \cdot 10^{-6}$
1	1,286796423	1,286796423	0,1000000056	0,1	0,0056	2,2
2	2,573595597	2,573595597	0,200000225	0,2	0,23	4,4
3	3,860397647	3,860397647	0,3000006679	0,3	0,67	1,2
4	5,147192479	5,147192479	0,4000005498	0,4	0,55	1,7
5	0,150805658	0,150805658	0,5000007158	0,5	0,72	6,4
6	1,437593734	1,437593734	0,6000000727	0,6	0,073	0,13
7	2,724389916	2,724389916	0,7000000596	0,7	0,06	2,4
8	4,011189339	4,011189339	0,8000002983	0,8	0,3	1
9	5,297987002	5,297987002	0,9000004003	0,9	0,4	2,9
10	0,301594302	0,301594302	1,0000001094	1	0,11	–
$y_m$			$6,4 \cdot 10^{-6}$			

**Заключение**

В работе обобщены основополагающие особенности оценки соответствия нормам стабильности частоты синхросигнала осуществляется для четырех типов смещения частоты входного опорного сигнала от номинальной частоты: режим свободных колебаний, минимальная полоса статического слежения, динамического слежения и захвата ведомых устройств.

**Список источников:**

**References:**

1. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи / Пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, С.Я. Несвитской, Н.Р. Триски; Под ред. А.В. Рыжкова. – М.: Мир, 2003. – 417 с.  
 2. Rec. G.810. Definitions and terminology for synchronization networks. – 1996–08. – Geneva: ITU-T, 1996. – 27 p.

1. Breni S. Synchronization of Digital Telecommunications Networks. Biryukov NL, Nesvitskaya SYa, Triska NR, translators; Ryzhkov AV, editor. Moscow: Mir; 2003.  
 2. Rec. G.810. Definitions and Terminology for Synchronization Networks. 1996-08. Geneva: ITU-T; 1996.

3. Инструкция по метрологическому обеспечению первичных эталонных генераторов (ПЭГ) системы сетевой тактовой синхронизации (ТСС): Утв. Минсвязи России 26.10.99. – Москва: МК-Полиграф, 2000. – 56 с.

4. Rec. G.811. Timing characteristics of primary reference clocks. – 1997–09. – Geneva: ITU-T, 1997. – 11 p.

5. Батенков К.А., Фокин А.Б. Анализ надежности телекоммуникационных сетей, поддерживающих механизмы защитного переключения и восстановления для одного основного маршрута // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 65. – С. 58–68.

6. Rec. G.813. Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC). – 2003–03. – Geneva: ITU-T, 2003. – 36 p.

7. Rec. G.812. Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks. – 2004–06. – Geneva: ITU-T, 2004. – 46 p.

8. Rec. G.811.1. Timing characteristics of enhanced primary reference clocks. – 2017–08. – Geneva: ITU-T, 2017. – 14 p.

9. Батенков К.А. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 6(115). – С. 53-63.

3. Instructions for Metrological Support of Primary Reference Clocks (PRC) of the Network Clock Synchronization System (NCSS). Moscow: МК-Poligraf; 2000.

4. Rec. G.811. Timing Characteristics of Primary Reference Clocks. 1997-09. Geneva: ITU-T; 1997.

5. Batenkov K.A., Fokin A.B. Reliability Analysis of Telecommunication Networks Supporting Protective Switching and Recovery Mechanisms for One Main Route. Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. 2023;65:58-68.

6. Rec. G.813. Timing Characteristics of SDH Equipment Slave Clocks (SEC). – 2003-03. Geneva: ITU-T; 2003.

7. Rec. G.812. Timing Requirements of Slave Clocks Suitable for Use As Node Clocks in Synchronization Networks. 2004-06. Geneva: ITU-T; 2004.

8. Rec. G.811.1. Timing Characteristics of Enhanced Primary Reference Clocks. 2017-08. Geneva: ITU-T; 2017.

9. Batenkov K.A. Analysis of the Probability of Connectivity of a Telecommunications Network Based on the Reduction of Several Non-Connectivity Events to a Union of Independent Events. Information and Control Systems. 2021;6(115):53-63.

#### **Информация об авторах:**

##### **Батенков Кирилл Александрович**

доктор технических наук, профессор, профессор Московского технического университета связи и информатики, Scopus-Author ID 35777325300, Author-ID-РИНЦ 7727-1166, <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

##### **Катков Олег Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, сотрудник Академии ФСО России, Author-ID-РИНЦ 8389-7290

##### **Козленко Андрей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, доцент РТУ МИРЭА

#### **Information about the authors:**

##### **Batenkov Kirill Alexandrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow Technical University of Communications and Informatics, Scopus-Author ID: 35777325300, Author-ID-RSCI: 7727-1166, <http://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

##### **Katkov Oleg Nikolaevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Employee of Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Author-ID-RSCI: 8389-7290

##### **Kozlenko Andrey Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of MIREA – Russian Technological University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 21.09.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 06.02.2025.**

**The article was submitted 21.09.2024; approved after reviewing 16.12.2024; accepted for publication 06.02.2025.**

**Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.**

**Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.**