

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

## FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 517.98 : 519.2 : 621:039  
doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-1

### РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЖИВУЧЕСТИ В ЗАДАЧАХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

**В. А. Острейковский<sup>1</sup>, А. В. Сорочкин<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup>academicotr@yandex.ru, <sup>2</sup>sorochkin\_av@surgu.ru, <sup>3</sup>yurkov\_nk@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Последние десятилетия XX в. и новые десятилетия XXI в. характеризуются, с одной стороны, дальнейшим повышением конструктивной сложности и одновременно требованиям обеспечения высокого качества сложных критически важных систем. Особенно это относится к системам с длительными сроками активного существования и зачастую изготавливается малыми партиями или вообще в единичном экземпляре. *Материалы и методы.* Для решения задачи обеспечения надежности и безотказности указанных выше систем необходимо использовать современные математические и конструктивные методы и подходы к оценке показателей их долговечности и живучести. На решение этой проблемы и направлена настоящая статья. *Результаты и выводы.* Получены новые результаты применения современного функционального анализа в дополнение к существующим методам оценки показателей ресурса и срока службы, используемых как правило в основе теории длительной прочности. Показана возможность описания функционирования неустойчивых и необратимых процессов в сложных системах в модусах «прошлое–настоящее–будущее» время, т.е. учитывая фактор асимметрии внутреннего времени («возраст системы»).

**Ключевые слова:** исходный ресурс, остаточный ресурс, повреждаемость, зарождение дефектов, долговечность, живучесть, внутреннее время

**Для цитирования:** Острейковский В. А., Сорочкин А. В., Юрков Н. К. Развитие методов теории живучести в задачах долговечности структурно и функционально сложных динамических систем с длительными сроками активного существования. 2023. № 3. С. 5–11. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-1

### DEVELOPMENT OF METHODS OF SURVIVABILITY THEORY IN PROBLEMS OF DURABILITY OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

**V.A. Ostreykovskiy<sup>1</sup>, A.V. Sorochkin<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup>academicotr@yandex.ru, <sup>2</sup>sorochkin\_av@surgu.ru, <sup>3</sup>yurkov\_nk@mail.ru

**Abstract. Background.** The last decades of the XX century and the new decades of the XXI century are characterized, on the one hand, by a further increase in the constructive complexity and at the same time the requirements for ensuring high quality of complex critical systems. This is especially true for systems with long periods of active existence and is often manufactured in small batches or in general in a single copy. *Materials and methods.* To solve the problem of ensuring the reliability and reliability of the above-mentioned systems, it is necessary to use modern mathematical and constructive methods and approaches to assessing the indicators of their durability and survivability. This article is aimed at solving this problem. *Results and conclusions.* New results of the application of modern functional analysis have been obtained in addition to the existing methods for assessing resource and service life indicators, which are usually used as the basis of the theory of long-term strength. The possibility of describing the functioning of unstable and irreversible processes in complex systems in the modes of "past-present-future" time, i.e. taking into account the factor of asymmetry of internal time ("age of the system"), is shown.

**Keywords:** initial resource, residual resource, damage, origin of defects, long-eternity, survivability, internal time

**For citation:** Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V., Yurkov N.K. Development of methods of survivability theory in problems of durability of structurally and functionally complex dynamic systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3):5–11. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-1

### Введение

К началу XX в. наука о долговечности сложных высокоответственных систем достигла больших успехов. Так, человечество имеет положительный опыт проектирования и эксплуатации структурно и функционально сложных систем (СФСС) в высокотехнологичных отраслях с величиной ресурса и срока службы до 30–60 лет. В то же самое время появились требования к ресурсу до 80–100 лет в энергетической отрасли, медицине, космологии и других отраслях науки и технологий. Поэтому возникли тенденции к дальнейшему повышению показателей долговечности будущих СФСС. В этом смысле необходимы дальнейшие разработки методов обеспечения повышения ресурса и долговечности критически важных сложных систем. На решение этой вечной проблемы времени и направлена данная статья.

#### Анализ математических моделей ресурса по критериям повреждаемости и зарождения дефектов в конструкционных материалах элементов сложных систем

В настоящее время установлено, что причиной зарождения дефектов в конструкционных материалах элементов сложных систем являются повреждаемость как характеристика, приводящая к образованию дефектов. При этом важным критерием является условие предельного повреждения:

$$a_{\text{пр}} = 1. \quad (1)$$

Основными физико-химическими причинами этих процессов являются малоцикловая усталость материалов, кислородное и хлоридное растрескивание и образование дефектов возле отложения меди. Таким образом выполняется условие (1).

Обычно условие (1) разделяют на два компонента: механическую усталость и коррозионные дефекты. Поэтому их принято различать следующим образом:

1) для механических усталостных повреждений используется соотношение

$$a_{\text{МП}} = \sum_{i=1}^l \frac{N_i}{[N_{0i}]}, \quad (2)$$

где  $N_{0i}$  – допускаемое число циклов при  $i$ -м типе расчетного режима изменений напряжений, а  $N_i$  – число циклов при  $i$ -м типе расчетного режима изменений напряжений;

2) для повреждаемости от коррозионных дефектов в момент времени по формуле

$$a_{\text{КП}} = \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\tau_{\text{кз}}}, \quad (3)$$

где  $a_{\text{КП}}$  – повреждаемость от коррозионных дефектов в момент времени  $\tau$ ;  $\tau_{\text{кз}}$  – время до зарождения дефектов от коррозионных воздействий;

3) для случая совместного учета механических и коррозионных дефектов повреждаемость определяется суммированием повреждаемостей от каждого фактора по формуле

$$a_n = \frac{a_{n1}}{(1-a_{n2})(1-a_{n3})(1-a_{n4})\dots}, \quad (4)$$

где  $a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, \dots$  – ранжирование повреждаемости от каждого фактора.

Следовательно, выражения (1) и (4) определяют возможность зарождения дефектов от совместного действия как механических, так и коррозионных факторов. Так как характеристики повреждаемостей в соответствии с выражениями (2) и (3) являются случайными величинами и поэтому естественно, что искомые повреждаемости описываются статистическими распределениями, то вероятность зарождения дефектов

$$P_3 = P(a_n \geq 1), \quad (5)$$

где  $P_3$  – вероятность зарождения дефекта в любом месте конструкции.

Если при этом предположить, что дефекты могут возникать: 1) с различными статистическими распределениями и 2) нелинейными зависимостями, то вероятность зарождения любых дефектов может быть оценена методами статистического моделирования (в частности, методом Монте-Карло). Поэтому возникает задача об определении числа зарождающихся дефектов в зависимости от времени эксплуатации объекта, т.е. задача типовой модели оценки живучести системы [1]. Для решения этой сложной задачи каждая часть системы разбивается на элементы с учетом значений различных групп факторов:

- 1) параметров нагружения, давления и температуры;
- 2) однородности напряженно-деформированного состояния (НДС);
- 3) степени дефектности;
- 4) свойств материалов.

При решении этой задачи элементы системы разбиваются на ячейки в предположении о том, что зарождение трещин в любом месте конструкции оценивается методами статистического моделирования Монте-Карло.

### Аналитические зависимости показателей надежности элементов конструкции систем

Известно [1, 2], что количественные значения показателей надежности и готовности оборудования сложных систем можно оценивать заивисимостями показателей, приведенных в табл. 1<sup>1</sup>.

Таблица 1

Показатели надежности оборудования СФСС

Наименование показателя	Обозначение	Вид аналитической зависимости
1. Средняя наработка до отказа	$T_0$	$\int_0^{\infty} \left\{ \exp \left[ - \int_0^t \sum_{i=1}^N \lambda_i(\tau) \times d\tau \right] \right\} dt$
2. $\gamma$ – процентная наработка до отказа	$T_\gamma$	$\exp \left[ - \int_0^T \sum_{i=1}^N \lambda_i(\tau) \times d\tau \right]$
3. Средний ресурс до списания (полный)	$T_{\text{ср}}$	$\int_0^{\infty} \left\{ \exp \left[ - \int_0^t \sum_{i=1}^N \tau_i^j \times d\tau \right] \right\} dt$
4. $\gamma$ – процентный ресурс до списания (полный)	$T_{\text{р}\gamma}$	$\frac{\gamma}{100} = \exp \left[ - \int_0^{T_{\text{ср}} - T_{\text{р}\gamma}} \sum_{i=1}^N \tau_i^j \times d\tau \right]$
5. Среднее время восстановления	$T_{\text{вср}}$	$T_0 \times \sum_{i=1}^N [T_{\text{вср}}^i \times \tau_N^i(\tau)]$
6. Коэффициент готовности	$K_\Gamma$	$\prod_{i=1}^N \frac{T_0^i}{T_0^i + T_{\text{вср}}^i}$

<sup>1</sup> ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения.

По результатам табл. 1 можно сказать:

1. Формулы пп. 1, 2, 5 и 6 из табл. 1 характеризуют работоспособность систем до первого отказа.

2. В п. 6 табл. 1 приняты следующие обозначения:  $T_0^i$  – функция наработки до отказа  $i$ -го элемента составной единицы;  $T_{\text{всп}}^i$  – среднее время восстановления  $i$ -го элемента составной единицы.

3. Основой выбора критериев является сравнение значений показателей надежности для оборудования проектируемых систем или их модернизации.

4. И, по-видимому, самое главное: к настоящему времени сложилось мнение, что критерий надежности СФСС должен быть обеспечен, если одновременно обеспечены следующие четыре принципа надежности элементов:

а) безопасная работа всех основных элементов СФСС в целом;

б) вероятность перевода элемента в безопасное состояние при возникновении отказа в нем (принципы безопасности отказа);

в) обеспечение необходимого значения коэффициентов готовности;

г) оптимальные затраты на проведение ремонтных работ, связанных с его отказом.

На основе первого принципа допустимый уровень показателя надежности определяется по данным вероятностного анализа безопасности (ВАБ) соответствующей СФСС, т.е. при данных значениях показателей надежности обеспечивается безопасность работы всей СФСС. Например, для атомных электростанций (АЭС) в соответствии с отечественными и зарубежными требованиями по безопасности вероятность повреждения активной зоны реактора не превышает  $10^{-5}$  на реактор в год.

Второй принцип надежности СФСС обеспечен в том случае, если по конструкторской и нормативной документации определяется допустимый уровень показателей надежности с точки зрения обеспечения перевода элементов СФСС в безопасное состояние при возникновении в нем отказа.

Третий принцип надежности СФСС обеспечен тогда, когда коэффициенты готовности элементов сложных систем должны удовлетворять требуемому коэффициенту готовности всей сложной системы.

Четвертый принцип надежности связан с установлением взаимосвязи между допустимыми показателями и необходимым коэффициентом экономической эффективности эксплуатации элемента и СФСС в целом.

Обеспечение соответствия полученных в расчете показателей надежности оборудования СФСС с требуемыми можно повысить, например, за счет изменения периодичности контроля металла, конструктивных элементов, изменения требований к дефектоскопическому контролю в части допустимых размеров дефектов, уточнением сроков службы аппаратуры контроля и т.д.

### **Физическая сущность контроля учета эффекта асимметрии внутреннего времени в задачах оценки долговечности оборудования критически важных систем длительного активного существования**

В последней четверти XIX и первой четверти XX в. Академией науки СССР была издана серия книг «Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов», в которых были изложены современные результаты фундаментальных и прикладных работ в области прочности, ресурса и безопасности водо-водяных реакторов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на основе динамики длительной прочности<sup>1</sup>. Однако уже в конце XIX в. появились научные результаты, в которых было теоретически строго доказано наличие эффекта асимметрии времени [3] в сложных системах при наличии неустойчивостей и необратимых процессов в процессе применения по назначению. В связи с этим возникла необходимость применения новых подходов к анализу долговечности оборудования СФСС [2], с применением современных математических методов теории операторов функционального анализа.

Научно-техническая революция середины и конца XX в. обогатила науку новым подходом в теории асимметрии времени. В центре идей были работы научных школ А. М. Ляпунова, В. И. Вернадского и И. П. Пригожина. Многочисленные исследования в этих работах свидетельствуют, что неустойчивые и необратимые процессы имеют свои особенности на трех уровнях описания субмикроскопических, микроскопических и макроскопических систем. Установлено, что причинами сложных деформационных процессов, приводящих к отказам и катастрофам СФСС, являются

<sup>1</sup> ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения.

коррозия, эрозия, износ усталость, деформация и другие макроскопические процессы. В указанных и других макроскопических процессах первопричинами служат необратимые процессы типа химических реакций, диффузии, распада твердых растворов, адсорбции и др. Причем необратимые процессы обычно развиваются под действием комплекса внешних и внутренних эксплуатационных факторов внешней среды (температуры, влажности, давления, динамических и статических механических нагрузок, термодинамических ударов, облучения, воздействия электрических, магнитных и других полей), а также влияния человеческого фактора [4, 5].

Физический и математический смысл оператора внутреннего времени  $T$  детально изложен и теоретически обоснован в работах [3, с. 162–163, 220–225; 2, с. 69–111] и состоит в следующем: в его основу положено соотношение между унитарным оператором движения  $U = e^{-iLt}$  и нелокальным оператором  $T$ :

$$U_L^T T U_L = T + tI, \quad (6)$$

где  $L$  – линейный оператор Лиувилля;  $I$  – единичный оператор.

В работах [2] и [3] доказано, что оператор внутреннего времени порождает описание классической динамики, характерной для сильно неустойчивых систем. При этом каждая функция распределения состояния системы  $\rho$  может быть разложена по собственным функциям  $\{I, \varphi_{n,i}\}$

$$\rho = I + \sum_{-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_{n,i},$$

где  $\rho$  – собственное значение оператора  $T$ ;  $i$  – степень вырождения собственного значения  $n$ .

Тогда не составляет большого труда доказать следующее утверждение: если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию системы  $\rho$  могли быть поставлены в соответствие средний возраст (ресурс)  $T_\rho$  по формулам

$$T_\rho = \frac{\bar{\rho}, T \bar{\rho}}{\bar{\rho}, \bar{\rho}},$$

и в соответствии с формулой (6):

$$T_{\rho_i} = T_{\rho_0} + t_i \dots$$

Отсюда следует, что средний возраст состояния системы  $\rho$  соответствует состоянию системы в момент времени  $t_i$ . Но необходимо отметить: внутреннее время существенно отличается от внешнего времени, отсчитываемого по наручным часам. Оно, по меткому выражению И. П. Пригожина [3], соответствует средней глобальной оценке объекта, а не какой-либо его части.

Причем на внутреннее время существенно оказывают влияние:

- а) изменения в составе эксплуатационной прочности, опыт, квалификация;
- б) изменения климата;
- в) изменения эксплуатационных требований и т.д. к контрольному оборудованию;
- г) влияния отказов и замен как техники, так и обслуживающего персонала;
- д) климат, персонал (грамотность, культура и т.д.).

### Заключение

1. Выполненный анализ математических моделей по критериям повреждаемости и зарождения дефектов в конструкционных материалах элементов СФСС показал, что основными причинами являются механическая усталость и коррозионные процессы. При этом возникает задача об определении числа зарождающихся дефектов во времени применения СФСС по назначению, т.е. задача оценки живучести и долговечности систем [7].

2. Одной из главных характеристик оценки свойств живучести СФСС в соответствии с современной методологией механики разрушения является вероятность разрушения системы из-за образования сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения конструкционных материалов оборудования. Для количественного определения этой вероятности используются следующие показатели:

- условная вероятность образования сквозного дефекта и крупномасштабного разрушения элемента конструкции СФСС в момент  $t$  расчетного события;
- вероятности образования сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения от нескольких дефектов в элементах с учетом возникновения расчетных событий;
- полные вероятности образования сквозных дефектов и крупномасштабного разрушения конструкции оборудования.

3. Для определения количественных значений показателей безотказности и долговечности в теории надежности и готовности оборудования СФСС необходимо в соответствии с требованиями ГОСТ 27.002–2015 знать значения:

- функции распределения времени до отказа и до перехода в предельное состояние и интенсивности отказов элементов оборудования СФСС;
- средней наработки до отказа;
- $\gamma$ -процентной наработки до отказа;
- среднего ресурса до списания (полный);
- $\gamma$ -процентного ресурса до списания (полный);
- среднего времени восстановления;
- коэффициента долговечности.

4. Критерий надежности СФСС должен быть обеспечен, если одновременно выполнены четыре принципа надежности элементов:

- безопасная работа всех основных элементов СФСС в целом;
- принципы безопасного отказа элементов;
- обеспечение необходимого значения коэффициента готовности;
- оптимальные затраты на проведение ремонтных работ, связанных с его отказом.

5. В период с 1987 по 2009 г. в России были изданы девять томов серии книг «Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов», посвященных результатам фундаментальных и прикладных разработок области прочности, ресурса и безопасности водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) и выполненных на базе проекта научно-образовательного центра Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Опытно-конструкторского бюро «Гидропресс». В результате развития предложенных методов и критериев обоснования прочности, ресурса и живучести предложены единые подходы к поэтапному определению нормирования, результативности и повышения ресурса и безопасности новых поколений ВВЭР с учетом штатных и нештатных режимов эксплуатации. Вместе с тем необходимо пожелать научным работникам указанных организаций обратить внимание на новые подходы к обоснованию надежности, безопасности и живучести таких сложных и высокоопасных комплексов, как ВВЭР в режимах их эксплуатации, и использовать методы и модели теории асимметрии внутреннего времени [3–5].

### Список литературы

1. Махутов Н. А., Фролов В. К., Драгунов Ю. Г. [и др.]. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов / под ред. Н. А. Махутова и М. М. Гадениной. М. : Наука, 2009. 499 с.
2. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки : тр. Междунар. симп. по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. Вып. 37. С. 69–111.
3. Пригожин И. Р. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках / под ред. Ю. Л. Климонтовича. М. : Едиториал URSS, 2002. 288 с.
4. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
5. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 21–34.
6. Панкин А. М. Основные вопросы методологии диагностирования сложных технических объектов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 62–69. doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
7. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

## References

1. Makhutov N.A., Frolov V.K., Dragunov Yu.G. et al. *Issledovaniya napryazheniy i prochnosti yadernykh reaktorov. Analiz riska i povyshenie bezopasnosti vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov = Stress and strength studies of nuclear reactors. Risk analysis and improving the safety of water-water power reactors.* Moscow: Nauka, 2009:499. (In Russ.)
2. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Mathematical modeling of the effect of internal time asymmetry in the theory of durability of structurally and functionally complex critical systems. *Itogi nauki: tr. Mezhdunar. simp.po fundam. i priklad. problemam nauki = Results of science : proceedings of the International symposium by the foundation and the applied problems of science.* Moscow: RAN, 2018;(37):69–111. (In Russ.)
3. Prigozhin I.R. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh = From the existing to the emerging: time and complexity in the physical sciences.* Moscow: Editorial URSS, 2002:288. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A., Denisova T.Yu., Shevchenko E.N. *Asimetriya vremeni v teorii prognozirovaniya sostoyaniya dinamicheskikh sistem: monografiya = Time asymmetry in the theory of predicting the state of dynamic systems : monograph.* Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
5. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Shevchenko E.N. On the possibility of using the time asymmetry effect in the problems of assessing the durability of complex technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2019;(1):21–34. (In Russ.)
6. Pankin A.M. The main issues of methodology of diagnostics of complex technical objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(2):62–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
7. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(4):5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

## Информация об авторах / Information about the authors

**Владислав Алексеевич Острейковский**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры информатики  
и вычислительной техники,  
Сургутский государственный университет  
(Россия, г. Сургут, пр-т Ленина, 1)  
E-mail: academicostr@yandex.ru

**Андрей Викторович Сорочкин**

аспирант,  
Сургутский государственный университет  
(Россия, г. Сургут, пр-т Ленина, 1)  
E-mail: sorochkin\_av@surgu.ru

**Николай Кондратьевич Юрков**

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

**Vladislav A. Ostreykovskiy**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of information theory  
and computer technology,  
Surgut State University  
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

**Andrey V. Sorochkin**

Postgraduate student,  
Surgut State University  
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

**Nikolay K. Yurkov**

Doctor of technical sciences, professor,  
the honoured worker of science  
of the Russian Federation,  
head of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 20.05.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 19.06.2023**

**Принята к публикации/Accepted 24.07.2023**