

УДК 004.89.075.8  
doi:10.21685/2307-5538-2022-4-2

## СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

А. С. Ишков

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
ishkovanton@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена необходимостью принимать управленческие решения по обеспечению надежности изделий электронной техники в условиях недостаточной информации и при неизвестных алгоритмах решения задачи. Показаны преимущества использования современных информационных технологий для автоматизации процесса формирования управленческого решения на разных этапах жизненного цикла изделия. Предложена система поддержки принятия решения, позволяющая оценивать показатели надежности изделий электронной техники с использованием элементов искусственного интеллекта и уникальных знаний экспертов. *Материалы и методы.* Компьютерная система поддержки принятия решений для обеспечения надежности вакуумных изделий в общем случае включает модули управления, обработки, хранения, а также программного обеспечения, обеспечивающего ввод и вывод информации, в том числе в графической форме. База данных системы содержит компьютерную модель изделия, включающую описание технических характеристик изделия, методики испытаний, методы расчета и прогнозирования показателей надежности и способы анализа влияния материалов и технологии изготовления на качество изделия. *Результаты.* Обоснована эффективность использования системы поддержки принятия решения за счет снижения материальных и временных затрат на натурные испытания изделий. *Выводы.* Представлен алгоритм работы системы поддержки принятия решения для оценки показателей надежности вакуумных изделий, в основу которого положена математическая модель времени натекания молекул водорода и гелий через вакуумно-плотную оболочку изделия. Показана возможность комбинации различных сочетаний параметров изделия, а также уровней внешних воздействующих факторов для достижения заданных значений показателей надежности.

**Ключевые слова:** надежность, экспертная система, вакуумные выключатели, алгоритм, натекание, вакуум, температура

**Для цитирования:** Ишков А. С. Система поддержки принятия решения для оценивания показателей надежности изделий электронной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 16–23. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-2

## DECISION SUPPORT SYSTEM FOR EVALUATION RELIABILITY INDICATORS OF ELECTRONIC PRODUCTS

A.S. Ishkov

Penza State University, Penza, Russia  
ishkovanton@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The relevance of the topic is due to the need to make management decisions to ensure the reliability of electronic products in conditions of insufficient information and unknown algorithms for solving the problem. The advantages of using modern information technologies to automate the process of forming a management decision at different stages of the product life cycle are shown. A decision support system is proposed that allows evaluating the reliability indicators of electronic products using elements of artificial intelligence and unique expert knowledge. *Materials and methods.* A computer decision support system for ensuring the reliability of vacuum products generally includes modules for control, processing, storage, as well as software that provides input and output of information, including in graphical form. The system database contains a computer model of the product, including a description of the technical characteristics of the product, test methods, methods for calculating and predicting reliability indicators, and methods for analyzing the effect of materials and manufacturing technology on product quality. *Results.* The effectiveness of using the decision support system by reducing the material and time costs for full-scale testing of products is substantiated. *Conclusions.* An algorithm for the operation of a decision support system for evaluating the reliability indica-

tors of vacuum products is presented, which is based on a mathematical model of the time of leakage of hydrogen molecules and gels through a vacuum-tight shell of a product. The possibility of a combination of various combinations of product parameters, as well as levels of external influencing factors to achieve the specified values of reliability indicators is shown.

**Keywords:** reliability, expert system, vacuum switches, algorithm, leakage, vacuum, temperature

**For citation:** Ishkov A.S. Decision support system for evaluation reliability indicators of electronic products. *Izmenenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):16–23. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-2

### **Введение**

В настоящее время одной из важных проблем измерительной техники является поиск путей по повышению достоверности и точности оценивания показателей надежности изделий электронной техники (ИЭТ). На сегодняшний день область знаний, посвященная проблемам надежности ИЭТ, характеризуется большими объемами информационных ресурсов, которые содержат методики проведения испытаний на надежность, методы прогнозирования показателей надежности различных групп и типов радиоэлектронных компонентов. Накоплены массивы экспериментальных данных по влиянию на качество изделий различных внешних воздействующих факторов, виды отказов и причины, их вызывающие [1].

В связи с увеличением сложности ИЭТ и возрастающими требованиями к их качеству и надежности увеличивается значимость проблемы доступа к уже накопленным на различных предприятиях, научных организациях объемам различной информации, касающейся надежности [2]. Особенностью области знаний, посвященной проблеме надежности, является то, что большая часть знаний является личным опытом специалистов высокого уровня (экспертов) в области надежности [1]. Экспертам часто приходится принимать управленческие решения для обеспечения надежности ИЭТ в условиях недостаточной информации, при неизвестных алгоритмах решения поставленной задачи, а также в условиях риска получения неудовлетворительного результата при существенных понесенных материальных и временных затратах. Это обусловлено тем, что современные многофункциональные ИЭТ повышенной сложности характеризуются большим количеством контролируемых параметров, которые различаются по своей информативности и степени доступности, а также различными условиями эксплуатации. Процесс исследования и оценки показателей надежности таких изделий, особенно на этапе их разработки, характеризуется либо принятием решений в условиях высокой степени неопределенности, либо требует значительных затрат материальных и временных ресурсов для проведения испытаний и различных экспериментальных исследований [3]. Непрерывное техническое усложнение ИЭТ предъявляет требования к постоянному повышению квалификации разработчиков изделий, конструкторов, инженеров, персоналу испытательных лабораторий. Все это подтверждает возрастающее влияние человеческого фактора на обеспечение надежности изделий.

### **Постановка задачи исследования**

Имеющиеся знания (математические модели, методики испытаний и расчета) довольно слабо структурированы, так как имеется множество типов и видов ИЭТ, режимов и условий их работы, соответственно, имеют место различные требования к показателям надежности, методам и способам их подтверждения и оценки. Широко применяемыми способами оценки показателей надежности ИЭТ являются испытания, прогнозирование и расчет [4]. К настоящему времени для анализа надежности отдельных видов ИЭТ разработана и накоплена большая база знаний как теоретического, так и прикладного характера. Задача расчета и моделирования показателей надежности решается применением различных математических моделей, большей частью основанных на методах теории вероятностей и математической статистики. Этот факт позволяет автоматизировать процесс выполнения соответствующих работ. Однако другие этапы работы, такие как выбор исходных данных и методики расчета, анализ и инженерная интерпретация результатов, выполняются вручную из-за их сложной формализуемости [5]. В результате качество итоговых результатов анализа показателей надежности ИЭТ существенно зависит от квалификации исполнителей. Кроме того, усложнение структуры и пара-

метров современных ИЭТ приводит к увеличению трудоемкости анализа и расчета показателей надежности. К тому же необходимо также учитывать влияние различных внешних воздействий (механических, температурных, электрических и т.п.) на показатели надежности ИЭТ. Это обстоятельство приводит к тому, что инженерные методики анализа надежности становятся все более сложными для практического применения [1]. Эволюция вычислительной техники и средств коммуникации несет за собой новые возможности обработки информации и повышает актуальность проблемы переноса части интеллектуальной сферы человеческой деятельности в сферу автоматизации принятия управленческих решений и реализации цифровой поддержки процесса решения задач в области обеспечения надежности ИЭТ [6].

#### *Анализ методов исследования*

К числу эффективных методов, обеспечивающих автоматизированную поддержку принятия управленческих решений в целях обеспечения надежности ИЭТ, относится внедрение информационных технологий [1]. Наличие и использование компьютерной системы для обеспечения надежности, аккумулирующей базу знаний, становятся незаменимыми в условиях повседневной деятельности предприятий разработчиков и изготовителей ИЭТ. В связи с этим данная предметная область, безусловно, нуждается в системе поддержки принятия решения (СППР), выполняющей информационную, методическую и организационную работу. Таким образом, теория и практика по решению проблем обеспечения надежности ИЭТ требуют не только разработки методик проведения испытаний на надежность, методов оценки показателей надежности и автоматизированной аппаратуры для проведения испытаний, но и создания информационно-экспертных систем для обеспечения доступа ко всему накопленному опыту и знаний в области надежности с целью более полного и оперативного его использования.

#### *Анализ принципа работы и структуры системы поддержки принятия решения*

В общем случае СППР относятся к информационным экспертным системам и представляют собой достаточно сложные программные комплексы, в которых собраны знания и опыт специалистов с целью его использования другими пользователями при наличии у них такой необходимости. Для экспертных систем в области исследования и оценки надежности ИЭТ целесообразно их построение и использование на основе искусственного интеллекта с целью принятия управленческих решений в автоматизированном режиме с учетом конкретной задачи и исходных данных. Подобное решение позволит создать компьютерную модель конкретного типа ИЭТ, поддерживающую период всего его жизненного цикла, начиная с решения проблем оценки показателей надежности на этапе разработки до получения экспериментальных данных по результатам эксплуатации в аппаратуре потребителей [4]. Математические модели, описывающие функционирование изделия, методики расчета показателей надежности, результаты натурных испытаний и сведения, полученные в ходе эксплуатации, загружаются в виртуальную информационную среду. Такая компьютерная модель должна включать основные технические характеристики конкретного типа ИЭТ, числовая оценка показателей надежности в различных режимах и условиях работы и хранения, методики испытаний на безотказность и сохраняемость, методики прогнозирования показателей надежности, оценки влияния основных материалов и комплектующих, а также особенности технологии изготовления на показатели надежности. В результате создается полное электронное описание изделия.

Для технической реализации подобной компьютерной модели и ее эксплуатации в рамках экспертной системы необходимо привлечение экспертов для получения теоретической информации и экспериментальных данных о конкретных видах ИЭТ и инженеров-программистов [2]. Представление информации от экспертов в виде базы знаний и применение методов логической обработки позволит получить специализированную экспертную систему с визуально-графическим представлением в виде совокупности программных модулей, наделенную свойствами: иерархичности, модульности, объектно-ориентированности. В области обеспечения надежности ИЭТ подобная экспертная система позволит проводить моделирование режимов воздействия на испытуемое изделие и принимать более обоснованные управляющие решения по его результатам.

Обобщенная структурная схема СППР, обеспечивающая поддержку принятия решений для оценивания параметров надежности ИЭТ, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема СППР для оценивания параметров надежности

Обобщенная структурная схема СППР включает модули управления, обработки, хранения, а также программного обеспечения, создающего условия для ввода и вывода информации, в том числе в графической форме.

Предложенная СППР позволяет осуществить поиск решений, построенных на базе формализованных уникальных знаний экспертов. Система отличается использованием элементов искусственного интеллекта для обработки значительных объемов информации и позволяет уменьшить влияние субъективного фактора при формировании управленческого решения.

#### ***Алгоритм, принцип действия и возможности системы поддержки принятия решения для оценивания параметров надежности вакуумных изделий***

Автором показана возможность получения результатов расчета и моделирования показателей надежности ИЭТ, принятия управленческих решений с помощью предложенной СППР на примере высокочастотных вакуумных выключателей и переключателей (далее – ВКУ).

ВКУ относятся к классу нейтральных электромагнитных реле контактного типа и широко используются в радиотехнических объектах в качестве коммутирующих элементов в высоковольтных цепях при напряжении 5 кВ и токе 12 А. Диапазон рабочих частот составляет от 1,5 до 80 МГц. Из-за использования в объектах ответственного назначения к надежности ВКУ предъявляются жесткие требования – изделия должны обеспечивать не менее 1106 коммутационных операций при допустимом количестве самоустраниющихся сбоев в среднем не более 1 на 3104 коммутационных операции для каждой контактной пары. Конструкция переключателя представляет собой вакуумную камеру, состоящую из металлокерамического корпуса, механизма перемещения подвижного контакта (замыкателя) и привода открытого или поляризованного типа (электромагнита). Контактная система состоит из двух неподвижных и одного подвижного контактов, расположенных с заданным зазором относительно друг друга внутри металлокерамической оболочки, в объеме которой создан высокий вакуум, служащий рабочим диэлектриком переключателя [7].

Качество ВКУ, его показатели надежности, а также эксплуатационные и технические характеристики в значительной степени зависят от магнитных свойств материала магнитопровода, от показателей силы трения в подвижных частях изделия, определяемых качеством материалов и конструкции вакуумно-плотной металлокерамической оболочки [8]. Таким образом, показатели надежности ВКУ в значительной степени зависят от того, насколько долго

будет поддерживаться заданное значение рабочего вакуума в вакуумно-плотной металлокерамической оболочке изделия.

Сложность принятия управленческих решений по обеспечению надежности ВКУ связана со сложностью изделия и, как следствие, с большим количеством учитываемых факторов, альтернатив и ограничений (сложная логика суждений и сложные взаимосвязи), а также с итерационным характером процесса принятия решения.

Научно обоснованная методика расчета и прогнозирования показателей надежности ВКУ на стадии их разработки положена в основу алгоритма работы, описываемой СППР. Методика заключается в определении времени сохранения вакуума в вакуумированном объеме ВКУ с помощью расчета интенсивности «натекания» – диффузии легких атмосферных газов (водорода и гелия) через вакуумно-плотную оболочку изделий в зависимости от параметров внешних воздействующих факторов. Алгоритм работы СППР для оценивания показателей надежности ВКУ приведен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм работы СППР для анализа надежности ВКУ

Процесс оценки параметров надежности ВКУ связан с принятием решений о том, какие параметры и как контролировать, какие использовать математические модели и виды контроля, какие методики применять для анализа полученной информации. Ситуация многокритериального принятия решений формально описывается следующей моделью, состоящей из совокупности входных  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  и выходных параметров  $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ . Поддержка принятия решений представляется задачей формирования и выбора лучшей альтернативы из различных комбинаций исходных данных [5].

В формализованном виде требуется найти набор входных параметров, которые обеспечивают минимум целевой функции ( $Y$ ) в виде взвешенной суммы рассогласований по каждому заданному критерию:  $Y = \min \sum_{i=1}^m k_i (f_i(x) - f_i^0)$ , где  $k_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го критерия;  $f_i^0$  – требуемое значение критерия. На стадии разработки ВКУ конструктор может комбинировать различные сочетания параметров изделия, уровни внешних воздействующих факторов, чтобы обеспечить требуемые показатели надежности. Интерфейс системы позволяет вводить значения параметров для расчета, указывать вид и марку применяемых в изделии материалов, манипулировать ими для составления различных сочетаний и оперативно получать различные варианты результатов.

Для функционирования предложенной СППР применены математические модели, которые наполняют базу знаний и позволяют рассчитать время сохранения вакуума в изделии. В результате проведенных исследований разработчиками ВКУ установлено, что время натекания наиболее интенсивно проникающих газов из атмосферы водорода и гелия в вакуумно-плотную металлокерамическую оболочку изделия зависит от геометрических размеров вакуумированного объема, физических и химических параметров материалов изделия, условий внешних воздействующих факторов [8]. В целях прогнозирования показателей надежности ВКУ в качестве параметров математической модели, позволяющих ускорить процесс натекания легких газов в вакуумированный объем ВКУ, является повышенная температура и избыточное внешнее давление сверх нормального.

При исследовании влияния температуры на гамма-процентную наработку ВКУ экспертами-разработчиками данных изделий было обосновано использование формулы Френкеля:

$$t_{is} = t_0 \exp\left(\frac{E_{i\text{дес}}}{RT}\right),$$

где  $T$  – температура вакуумно-плотной оболочки;  $E_{i\text{дес}}$  – энергия активации десорбции адсорбентов (металлов и керамики);  $t_0$  – коэффициент, связанный с периодом колебаний атомов на поверхности адсорбента;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Формула Френкеля положена в основу математической модели системы поддержки принятия решений, позволяющей автоматизированным способом производить расчет времени пребывания молекул наиболее интенсивно проникающих газов из атмосферы (водорода на поверхности металлических элементов вакуумно-плотной оболочки и гелия на поверхности керамической оболочки). На рис. 3 приведен вид интерфейса системы поддержки, содержащий график зависимости гамма-процентной наработки одного из образцов ВКУ в зависимости от температуры на вакуумном выключателе.

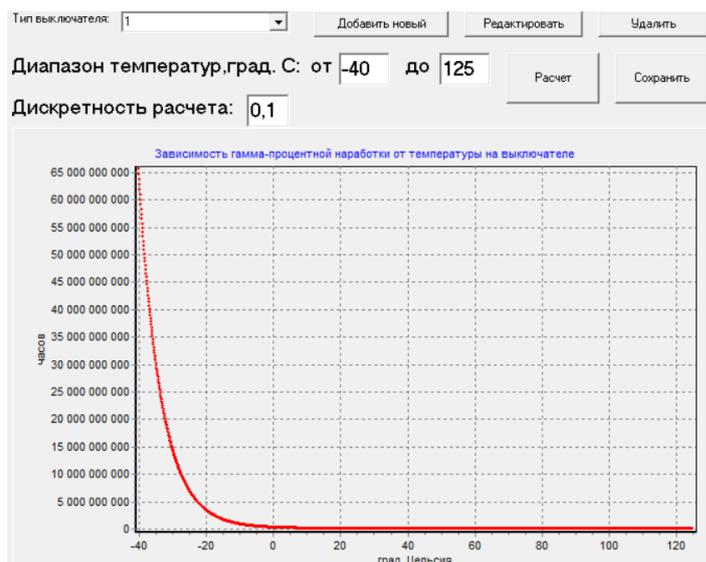


Рис. 3. График зависимости гамма-процентной наработки ВКУ в зависимости от температуры

Таким образом, конструктор изделия с помощью предложенной СППР может оперативно, в сжатые сроки и без существенных материальных затрат проводить исследование влияния различных конструктивных параметров изделия и уровней внешних воздействующих факторов на показатели надежности ВКУ. При необходимости система поддержки позволяет на основе рассчитанных показателей надежности формировать рекомендации разработчикам по корректировке различных аспектов проектных решений ВКУ и технологического процесса его изготовления.

### *Заключение*

Предложенная в работе СППР обладает высокой адаптивностью к режимам моделирования ИЭТ, обеспечивает возможность ввода различных технических параметров изделия. Это позволяет выполнять моделирование показателей надежности и применять методы структурной оптимизации при наличии альтернативных вариантов комплектующих. Использование для различных изделий ИЭТ с однородными параметрами методик и математических моделей, разработанных экспертами-профессионалами конкретной предметной области, позволяет значительно снизить стоимость процесса оценки надежности ИЭТ и увеличить достоверность получаемых результатов. Предложенная СППР эффективно используется при экспериментальных исследованиях при разработке новых ИЭТ с целью оценки качества функционирования испытуемого изделия в различных условиях внешних воздействий, для сравнения вариантов технических решений, проверки запасов работоспособности во всех режимах функционирования и т.д.

Внедрение предложенной СППР на предприятия электронной промышленности позволяет исключить проведение многочисленных натурных испытаний, тем самым снизить себестоимость ИЭТ за счет сокращения затрат как на испытательное оборудование, так и на дорогостоящие испытательные образцы. Предложенная СППР обладает возможностью обучения путем актуализации формализованных знаний экспертов, а также знаний об удачных и неудачных попытках решения задач ее пользователями. Для повышения эффективности использования предложенной СППР целесообразно ее интегрировать в информационную систему предприятия собой и создавать с последней единое информационное пространство. Это позволит обеспечить единую поддержку данных, исключить дублирование информации и упростить работу пользователей.

### *Список литературы*

1. Зуров Е. В. Информационная технология принятия решений при управлении сложными объектами с оценкой технического состояния на основе экспертных систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 16 с.
2. Юрков Н. К., Алмаметов В. Б., Држевецкий Ю. А. Методология экспертных систем в анализе надежности сложных технических систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 2. С. 439–440.
3. Избачков Ю. С., Петров В. Н. Информационные системы : учебник для вузов. 2-е изд. СПб. : Питер, 2015. 656 с.
4. Колчин А. Ф., Овсянников М. В., Стрекалов А. Ф., Сумароков С. В. Управление жизненным циклом продукции. М. : Анахарсис, 2012. 345 с.
5. Норенков И. П., Кузьмик П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 245 с.
6. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. СПб. : Политехника, 2017. 152 с.
7. Ишков А. С., Чураков П. П. Контроль магнитных параметров при изготовлении высокочастотных вакуумных устройств // Контроль. Диагностика. 2006. № 3. С. 17–19.
8. Ишков А. С. Измерение магнитных характеристик материалов вакуумных коммутирующих устройств : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2006. 22 с.
9. Солодовников Д. С., Абызгильдин А. Ю. Визуализация технологического процесса // Теория и практика процессов химтехнологии (Марушкинские чтения) : материалы Всерос. науч. конф. Уфа : УГНТУ, 1996. С. 96.
10. Красильников В. Эволюция экспертных систем. История и перспективы. URL: <http://www.kv.by/index2005401103.htm>

## References

1. Zurov E.V. *Information technology of decision-making in the management of complex objects with an assessment of the technical condition based on expert systems*. PhD abstract. Saint Petersburg, 2007:16. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Almametov V.B., Drzhevetskiy Yu.A. Methodology of expert systems in reliability analysis of complex technical systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2010;2:439–440. (In Russ.)
3. Izbachkov Yu.S., Petrov V.N. *Informatsionnye sistemy: uchebnik dlya vuzov. 2-e izd. = Information systems : textbook for universities. 2nd ed.* Saint Petersburg: Piter, 2015:656. (In Russ.)
4. Kolchin A.F., Ovsyannikov M.V., Strelkov A.F., Sumarokov S.V. *Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii = Product lifecycle management*. Moscow: Anakharsis, 2012:345. (In Russ.)
5. Norenkov I.P., Kuz'mik P.K. *Informatsionnaya podderzhka naukoemkikh izdeliy. CALS-tehnologii = Information support of high-tech products. CALS-technologies*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2015:245. (In Russ.)
6. Zil'berburg L.I., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. *Reinzhiniring i avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v mashinostroenii = Reengineering and automation of technological preparation of production in mechanical engineering*. Saint Petersburg: Politehnika, 2017:152. (In Russ.)
7. Ishkov A.S., Churakov P.P. Control of magnetic parameters in the manufacture of high-frequency vacuum devices. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2006;(3):17–19. (In Russ.)
8. Ishkov A.S. *Measurement of magnetic characteristics of materials of vacuum switching devices*. PhD abstract. Penza, 2006:22. (In Russ.)
9. Solodovnikov D.S., Abyzgil'din A.Yu. Visualization of the technological process. *Teoriya i praktika protsessov khimtekhnologii (Marushkinskie chteniya): materialy Vseros. nauch. konf. = Theory and practice of chemical technology processes (Marushkin readings) : materials of the All-Russian scientific conf.* Ufa: UGNTU, 1996:96. (In Russ.)
10. Krasil'nikov V. *Evolyutsiya ekspertnykh sistem. Istoriya i perspektivy = Evolution of expert systems. History and prospects*. (In Russ.). Available at: <http://www.kv.by/index2005401103.htm>

## Информация об авторах / Information about the authors

**Антон Сергеевич Ишков**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: [ishkovanton@mail.ru](mailto:ishkovanton@mail.ru)

**Anton S. Ishkov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio engineering and radio electronic systems,  
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 04.04.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 13.05.2022**

**Принята к публикации/Accepted 10.06.2022**