

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ЗАГЛУБЛЕННОГО СООРУЖЕНИЯ

И. И. Звенигородский¹, Ю. Т. Зырянов², Д. И. Ульшин³

^{1,3} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

² Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

¹ zvendocent@mail.ru, ² zut-tmb@mail.ru, ³ wm_d@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность работы обусловлена возможностью повышения энергоэффективности при помощи нейросетевых систем автоматического управления, так как существующие модели систем вентиляции и кондиционирования воздуха и системы автоматического управления ими рассматривают отдельные процессы, протекающие в системе вентиляции и не учитывают всех каналов управления и возмущения, взаимосвязь регулируемых параметров, пространственную распределенность точек приложения воздействий и переменность структуры объекта управления. Целью работы является снижение затрат электроэнергии за счет повышения эффективности использования энергоносителей, а также повышения качества управления. *Материалы и методы.* Для достижения поставленных целей использованы методы компьютерного нейросетевого моделирования. *Результаты и выводы.* Построена нейросетевая модель системы автоматического управления процессом кондиционирования воздуха заглубленного сооружения, функционирующая в условиях влияния ступенчатых возмущающих воздействий с применением нейросетевых регуляторов, осуществляющих управление по методу «обнаружения разладки». Предварительные расчеты энергоэффективности предлагаемого нейросетевого регулирования в реальных системах показывают, что экономия электрической энергии в сравнении с традиционным ПИД-регулированием достигает 7–10 % в зависимости от режима функционирования системы, что в большеобменных системах является целесообразным и востребованным с экономической точки зрения.

Ключевые слова: системы автоматического управления, нейросетевые регуляторы, заглубленное сооружение

Для цитирования: Звенигородский И. И., Зырянов Ю. Т., Ульшин Д. И. Использование нейросетевых регуляторов для повышения энергоэффективности и качества системы вентиляции и кондиционирования воздуха заглубленного сооружения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 99–105. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-12

THE USE OF NEURAL NETWORK REGULATORS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY AND QUALITY OF THE VENTILATION AND AIR CONDITIONING SYSTEM OF A BURIED STRUCTURE

I.I. Zvenigorodsky¹, Yu.T. Zyryanov², D.I. Ulshin³

^{1,3} Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia

² Tambov State Technical University, Tambov, Russia

¹ zvendocent@mail.ru, ² zut-tmb@mail.ru, ³ wm_d@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the work is due to the possibility of increasing energy efficiency with the help of neural network automatic control systems, since the existing models of ventilation and air conditioning systems and their automatic control systems consider individual processes occurring in the ventilation system and do not take into account all control channels and disturbances, the relationship of adjustable parameters, spatial distribution points of application of influences and variability of the structure of the control object. The aim of the work is to reduce the cost of electricity by improving the efficiency of energy use, as well as improving the quality of management. *Materials and methods.* To achieve the goals set, the methods of computer neural network modeling were used. *Results and conclusions.* A neural network model of an automatic control system for the process of air conditioning of a buried structure was built, which operates under the influence of stepwise disturbing influences using neural network

controllers that control by the method of "detection of discord". Preliminary calculations of the energy efficiency of the proposed neural network control in real systems show that the saving of electrical energy in comparison with traditional PID control reaches 7–10 % depending on the mode of operation of the system, which in large-scale systems is expedient and in demand from an economic point of view.

Keywords: automatic control systems, neural network controllers, buried structures

For citation: Zvenigorodsky I.I., Zyryanov Yu.T., Ulshin D.I. The use of neural network regulators to improve the energy efficiency and quality of the ventilation and air conditioning system of a buried structure. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(1):99–105. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-12

Введение

В подавляющем большинстве случаев системы автоматического управления (САУ) проектируются исходя из допущения, что в процессе эксплуатации их параметры всегда остаются постоянными и неизменными. В реальности это является практически невозможным вследствие того, что элементы САУ и объекта управления со временем изнашиваются, а условия внешней среды меняются. Кроме того, в процессе эксплуатации возможны случайные деструктивные воздействия, меняющие характеристики различных элементов системы, например, аварии.

В отдельных случаях представляется возможным описать некоторые из протекающих процессов, однако из-за их вероятностного характера точное описание сильно затруднено. К примеру, фактор износа элементов системы можно учесть, рассчитав срок их эксплуатации и проводя превентивную замену даже исправно работающих элементов на новые (планово-предупредительное обслуживание и планово-предупредительный ремонт). Изменения или воздействия внешней среды можно заложить в исходную модель в виде различных возмущающих воздействий или же непосредственно на модели убедиться в сохранении устойчивости и качества функционирования САУ на всем диапазоне допустимых внешних условий.

Безусловно, перечисленные выше решения могут дать положительный результат, однако их отличает то, что они не являются оптимальными, а значит, на объектах военной инфраструктуры приводят к серьезным экономическим потерям, которые выражаются:

- в необходимости обязательного резервирования всех ключевых и жизненно необходимых элементов системы;
- замене по регламенту исправно функционирующих элементов;
- неоптимальной работе контура управления в течение периодов, когда внешние условия отличаются от расчетных, и что в совокупности влечет за собой значительный перерасход энергии и энергоносителей.

Случайные воздействия на элементы САУ совершенно непредсказуемы как по вероятности их возникновения, так и по производимому на систему эффекту. Резкие (аварийные) изменения в режиме функционирования объекта управления вследствие своей заметности легко отслеживаются и оперативно устраняются либо ремонтом, либо заменой вышедших из строя элементов. Однако небольшие, малозаметные, но длительные изменения способны вызвать такие отклонения в штатном режиме функционирования системы, которые могут привести к серьезным последствиям через некоторое время: повышенному износу, сбоям в других связанных САУ и даже полному выходу объекта управления из строя.

Все сказанное выше однозначно свидетельствует о важности развития методов автоматического управления, адаптированных к нестационарному поведению объекта [1–3]. Наиболее «радикальным» и наиболее сложным для автоматического управления представляется случай спонтанного скачкообразного изменения свойств системы в случае выхода параметров за нормируемый диапазон (или аварии).

Материалы и методы. Результаты исследования

Рассмотрим САУ процессом кондиционирования воздуха и поддержания заданных температурно-влажностных параметров в заглубленном сооружении.

Одним из возможных и перспективных путей развития САУ является применение теории нейронных сетей и нейросетевых регуляторов (НР). Такая нейросетевая САУ должна решать задачу создания и поддержания (стабилизации) заданных значений температуры и влагосодержания воздуха в рабочей зоне обслуживаемого помещения. Кроме того, требуется решить задачу автоматического изменения настроечных параметров регулирующих устройств в переходных процессах с целью по-

вышения качества управления, нахождения входного вектора нейрорегуляторов для снижения энергозатрат при повседневной эксплуатации и реализации управления по методу «оптимальных режимов».

На рис. 1 представлен общий вид двумерной связной САУ объектом с обратной связью, состояние которого измеряется непосредственно на выходе, а в канале наблюдения присутствуют возмущения $n_{\text{возм}}^{\text{БЫД}}(t)$ с некоторыми постоянными свойствами, ε_{θ} и ε_d – ошибки управления по каналам управления температурой и влагосодержанием воздуха соответственно. Параметры объекта управления постоянны во времени. В системе имеются линейные регуляторы, поддерживающие состояние объекта близким к заданной траектории.

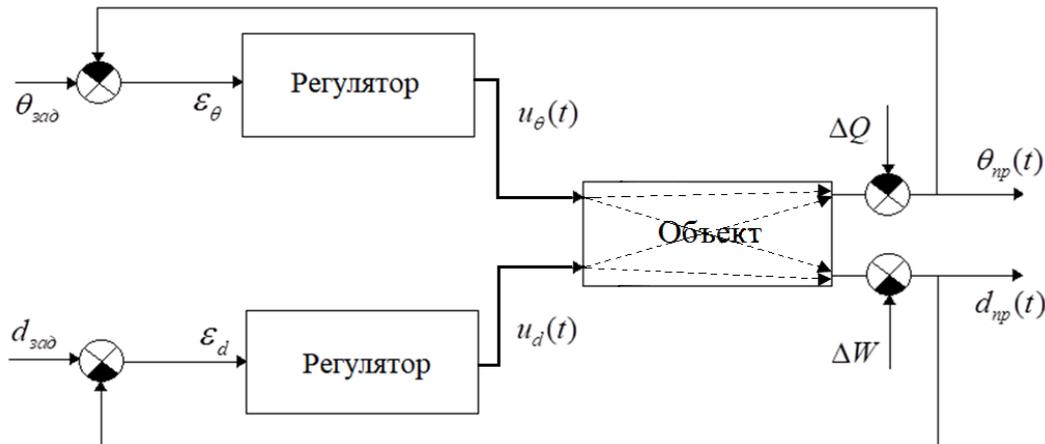


Рис. 1. Общий вид системы управления (ε_{θ} и ε_d – ошибки управления по каналам управления температурой)

Исходя из того, что ПИД-регулятор обеспечивает устойчивость и некоторое требуемое качество управления (перерегулирование, время регулирования, статическая ошибка и т.д.), можно предполагать, что НР, достаточно точно имитирующий исходный ПИД-регулятор, будет управлять системой с соответствующим качеством. Качество обучения искусственной нейронной сети определяется выбором архитектуры, обучающих данных и параметров алгоритма обучения. Для исследования влияния указанных факторов применительно к задаче имитации ПИД-регулятора система управления и ее составные части рассматриваются в дискретном времени с постоянным и достаточно малым шагом дискретизации.

Управляющее воздействие исходного ПИД-регулятора на объект управления (рис. 1) представляется как функция:

$$\begin{aligned} u_{\theta}(t) &= f(\varepsilon_{\theta}, p_{\text{сост}}); \\ u_d(t) &= f(\varepsilon_d, p_{\text{сост}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $p_{\text{сост}}$ – внутреннее состояние регулятора («память»), изменяющееся каждый такт времени по некоторому правилу; ε_{θ} и ε_d – ошибки управления по каналам управления температурой и влагосодержанием приточного воздуха.

Используя квадратичный критерий, задача синтеза НР представляется в виде

$$\varepsilon_{\text{скв}} = \sum_t \sqrt{(f(\varepsilon_{\theta}, p) - N^x(\mathbf{i}_t))^2 + (f(\varepsilon_d, p) - N^x(\mathbf{i}_t))^2} \rightarrow \min_{\forall \mathbf{i}_t \in I}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{скв}}$ – средняя квадратическая ошибка управления объектом; N^x – определенная архитектура нейросетевого регулятора; \mathbf{i}_t – некоторая информация, доступная о системе управления к моменту времени t ; I – это область возможных значений \mathbf{i} для регулятора.

Значение выходного управляющего воздействия исходного ПИД-регулятора вычисляется по формуле

$$u_i(t) = k_p \varepsilon_i + k_i \int_0^{t_2} \varepsilon_i dt + k_d \frac{\varepsilon_i(t)}{dt}, \quad (3)$$

где k_p – коэффициент усиления; k_i – коэффициент издррома; k_d – коэффициент предварения; ϵ_i – ошибка управления.

Для формирования входного вектора НР использована динамическая модель с типовыми ПИД-регуляторами, настройка которых произведена по интегрально-квадратичному критерию (ИКК). Настроечные параметры линейных ПИД-регуляторов приведены в табл. 1

Таблица 1

Настроечные параметры линейных ПИД-регуляторов

Регулятор	Коэффициент усиления, k_{p11}	Коэффициент интегрирования, k_{i11}	Коэффициент дифференцирования, k_{d11}
PID1	0,06	0,0013	0,2
PID2	0,22	0,0006	0,35

Произведенные компьютерные вычислительные эксперименты с различными типами архитектур нейронных сетей регуляторов позволили остановиться на наиболее эффективной, применительно к данной задаче: один скрытый слой, состоящий из четырех нейронов, на вход подается входной вектор различной структуры, обучение нейросетевых регуляторов осуществлено поочередно для НР1 и НР2, на выборке длиной 270 значений, на протяжении 400 эпох, размер контрольной выборки составил 135 значений. В случае возрастания $E_{\text{СКВ}}$ на контрольной выборке обучение прекращалось досрочно. За критерий обучения принята минимизация среднеквадратической ошибки имитации $E_{\text{СКВ}}^{\text{НР1}}$.

Схема подключения нейронной сети регулятора, построенного в среде Matlab Simulink, приведена на рис. 2.

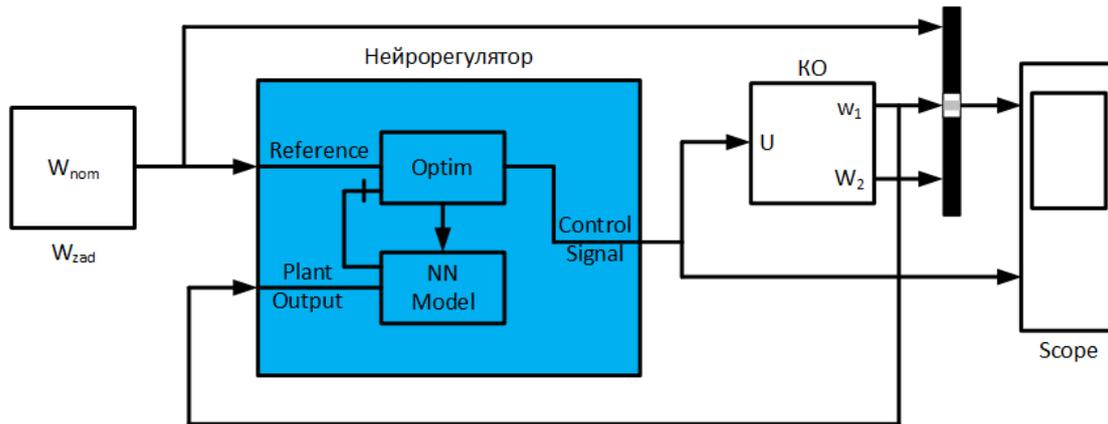


Рис. 2. Схема подключения нейрорегулятора

Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о том, что при увеличении значения возмущений $n_{\text{возм}}^{\text{выд}}(t)$ преимущество НР с входным вектором $r_t, \epsilon_{\text{СКВ}(t)}$ уменьшается. Таким образом, в отдельных случаях применение $\epsilon_{\text{СКВ}(t)}, \Delta\epsilon_{\text{СКВ}(t)}$ может оказаться оправданным.

При исследовании вариантов предварительного обучения НР сделан вывод, что для формирования входного вектора наилучшим оказался принцип совмещенного управления по возмущению и отклонению: $r_t, \epsilon_{\text{СКВ}(t)}$.

Следует понимать, что копирование свойств исходного ПИД-регулятора позволяет произвести его замену и сопоставить полученный НР с исходным, однако не имеет смысла формировать архитектуру нейросетевого регулятора, базируясь на свойствах исходного ПИД-регулятора, так как НР, изначально обученный в соответствии с исходным ПИД-регулятором, впоследствии должен менять свои свойства для минимизации $\epsilon_{\text{СКВ}}$.

На рис. 3 представлена нейросетевая модель САУ процесса вентиляции и кондиционирования воздуха. Модель имеет в своем составе два предварительно обученных на инверсной модели объек-

та управления нейросетевых регулятора HP1 и HP2. В качестве входных векторов регуляторов принята выборка значений уставки и ошибки управления объектом в текущий момент времени $r_t, \epsilon_{\text{СКВ}}(t)$.

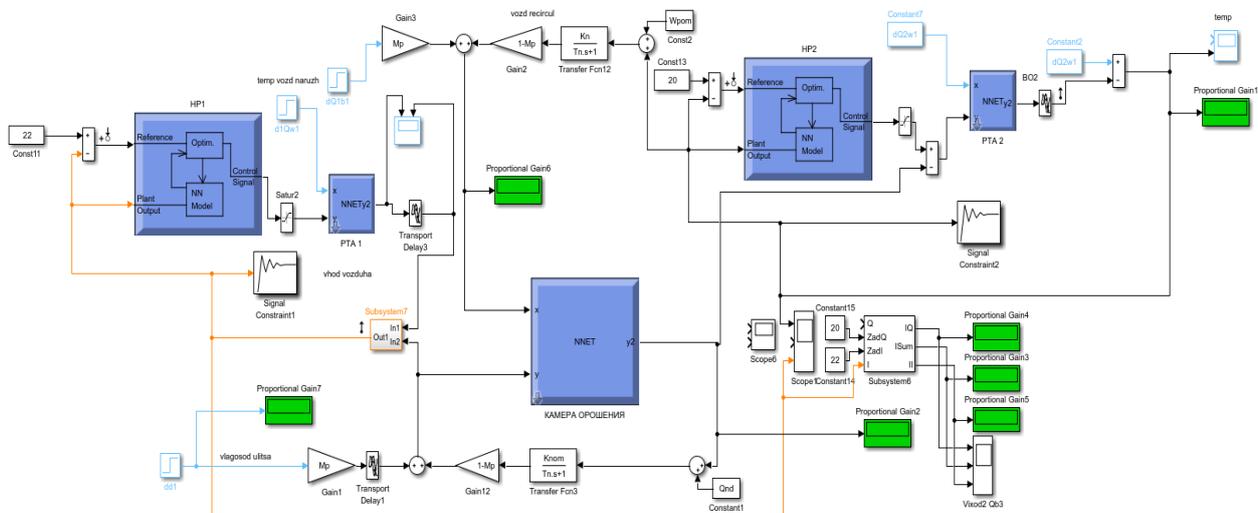


Рис. 3. Модель нейросетевой САУ системы вентиляции и кондиционирования воздуха

Сеть нейрорегуляторов имеет наиболее простую структуру, имеющую один скрытый слой, состоящий из четырех нейронов (в 2 раза больше числа входов). Параллельно с нейронной сетью регулятора включена нейронная сеть модели объекта управления. Обучение нейросетевых регуляторов осуществлено поочередно для HP1 и HP2, на выборке длиной 270 значений $\epsilon_{\text{СКВ}}$, на протяжении 400 эпох, размер контрольной выборки составил 135 значений. Такая нейросетевая модель, обученная на выборке реальных данных, позволяет изменять весовые коэффициенты нейронов сети на каждом шаге обучения, учитывать нелинейные свойства процессов теплообмена, протекающих в элементах системы (РТА1 и РТА2 на рис. 3), а следовательно, более точно описывать объект управления и тем самым повышать качество управления и энергоэффективность [4, 5].

Заключение

Предварительные расчеты энергоэффективности подобного нейросетевого регулирования в реальных САУ показывают, что экономия, например, электрической энергии в сравнении с традиционным ПИД-регулированием достигает 7–10 % в зависимости от режима функционирования системы, что в большеобменных системах является целесообразным и востребованным с экономической точки зрения. Исходя из этого можно полагать, что применение теории нейронных сетей к задачам повышения качества управления различными техническими системами, замены ПИД-регуляторов на нейросетевые и использование нейросетевого регулирования в целом, является актуальным и эффективным путем дальнейшего развития систем автоматического управления [6–8].

Список литературы

1. Креслин А. Я. Оптимизация энергопотребления системами кондиционирования воздуха. Рига, 1982. 155 с.
2. Елисеев В. Л., Филаретов Г. Ф. Моделирование ПИД-контроллера с помощью искусственной нейронной сети // Перспективные технологии автоматизации. Вологда, 1999. 108 с.
3. Рымкевич А. А., Халамейзер М. Б. Управление системами кондиционирования воздуха. М.: Машиностроение, 1987. 279 с.
4. Звенигородский И. И., Жуков А. С., Кулеш Д. Ю. Исследование процессов управления системой кондиционирования воздуха сооружения: отчет о НИР. Воронеж: ВАИУ, 2010. 95 с.
5. Карпис Е. Е. Повышение эффективности систем кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1987. 314 с.
6. Гришко А. К., Лукин В. С., Юрков Н. К. Синтез тестовых образов для оценки стойкости нейросетевых преобразователей в системах биометрической идентификации // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2. С. 32–40.
7. Кубасов И. А., Иванов А. И. Энтропийно-нейросетевой метод устранения противоречивости оценок экспертов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 56–63.

8. Иванов А. И., Иванов А. П., Куприяно Е. Н. Мультипликативно-нейросетевое объединение статистических критериев Херста и Мурота – Такеучи при проверке гипотезы нормальности малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 27–33.

References

1. Kreslin' A.Ya. *Optimizatsiya energopotrebleniya sistemami konditsionirovaniya vozdukha = Optimization of energy consumption by air conditioning systems*. Riga, 1982:155. (In Russ.)
2. Eliseev V.L., Filaretov G.F. Modeling of a PID controller using an artificial neural network. *Perspektivnye tekhnologii avtomatizatsii = Promising automation technologies*. Vologda, 1999:108. (In Russ.)
3. Rymkevich A.A., Khalameyzer M.B. *Upravlenie sistemami konditsionirovaniya vozdukha = Control of air conditioning systems*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:279. (In Russ.)
4. Zvenigorodskiy I.I., Zhukov A.S., Kulesh D.Yu. *Issledovanie protsessov upravleniya sistemoy konditsionirovaniya vozdukha sooruzheniya: otchet o NIR = Research of processes of control of the air conditioning system of a building: research report*. Voronezh: VAIU, 2010:95. (In Russ.)
5. Karpis E.E. *Povyshenie effektivnosti sistem konditsionirovaniya vozdukha = Improving the efficiency of air conditioning systems*. Moscow: Stroyizdat, 1987:314. (In Russ.)
6. Grishko A.K., Lukin V.S., Yurkov N.K. Synthesis of test images for assessing the durability of neural network converters in biometric identification systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(2):32–40. (In Russ.)
7. Kubasov I.A., Ivanov A.I. Entropy-neural network method of eliminating inconsistency of expert assessments. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):56–63. (In Russ.)
8. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyano E.N. Multiplicative neural network association of statistical criteria of Hurst and Murota – Takeuchi when testing the hypothesis of normality of small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):27–33. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иванович Звенигородский

кандидат технических наук,
доцент, начальник кафедры защитных сооружений,
Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина»
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а)
E-mail: zvendocent@mail.ru

Юрий Трифонович Зырянов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
радиоэлектронных и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: zut-tmb@mail.ru

Дмитрий Игоревич Ульшин

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина»
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а)
E-mail: wm_d@mail.ru

Igor I. Zvenigorodsky

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of protective structures,
Military Educational and Scientific Center
of the Air Force" Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky
and Yu.A. Gagarin"
(54a Sarykh Bolshevikov street, Voronezh, Russia)

Yury T. Zyryanov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of design
of radioelectronic and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Dmitry I. Ulshin

Candidate of technical sciences, researcher,
Military Educational and Scientific Center
of the Air Force" Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky
and Yu.A. Gagarin"
(54a Sarykh Bolshevikov street, Voronezh, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 08.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 19.01.2023

Принята к публикации/Accepted 15.02.2023