

УДК 517.977.58

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.40.1.010](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.010)

## Нейросетевая модель управления робототехническим комплексом при проведении аварийно-спасательных работ в условиях Крайнего Севера

Е.Г. Царькова<sup>1</sup>, А.В. Калач<sup>2</sup>, В.Н. Бобров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ФСИН России, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация  
[a\\_kalach@mail.ru](mailto:a_kalach@mail.ru)

**Резюме.** Геополитическая обстановка и усиление криминогенных, террористических угроз диктует необходимость освоения новых территорий, в том числе, Севера России. В статье приведены результаты исследования математической модели искусственной нейронной сети, учитывающей запаздывания, предназначенной для управления автопилотируемым наземным робототехническим комплексом, используемым для осуществления перевозок при проведении аварийно-спасательных работ в сложных природно-климатических условиях Арктического региона. Показан универсальный характер предлагаемого метода. Описан подход к нахождению решения задачи оптимизации с применением необходимых условий оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина и метода быстрого автоматического дифференцирования. Создан проблемно-ориентированный программный продукт, в основе которого лежит разработанный вычислительный алгоритм построения приближенного оптимального управления. Полученные в ходе численных экспериментов результаты подтверждают эффективность разработанного алгоритма при нахождении приближенного оптимального решения рассматриваемой задачи. Созданное программное средство может быть использовано для обучения искусственных нейронных сетей с динамикой, описываемой системой дифференциальных уравнений, учитывающих запаздывания. Предлагаемая математическая модель искусственных нейронных сетей применима при решении широкого круга прикладных задач робототехники, в том числе, направленных на разработку технических средств для проведения аварийно-спасательных работ в сложных природно-климатических условиях Арктического региона. Гибкость, устойчивость и адаптивность выбранной модели к изменению входных параметров обуславливают перспективность применения разработанного вычислительного алгоритма для решения задач управления сложными техническими системами.

**Ключевые слова:** робототехника, аварийно-спасательные работы, задача оптимального управления, принцип максимума, обучение искусственной нейронной сети, безопасность.

**Для цитирования:** Царькова Е.Г., Калач А.В., Бобров В.Н. Нейросетевая модель управления робототехническим комплексом при проведении аварийно-спасательных работ в условиях Крайнего Севера. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1291> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.010

## Neural network model of robotic complex control during emergency rescue operations under the conditions of the Far North

E.G. Tsarkova<sup>1</sup>, A.V. Kalach<sup>2</sup>, V.N. Bobrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, Russian Federation  
[a\\_kalach@mail.ru](mailto:a_kalach@mail.ru)

**Abstract.** The geopolitical situation and the increase in criminal and terrorist threats dictate the need to develop new territories, including the North of Russia. The article presents the results of a study of an artificial neural network mathematical model that takes into account delays designed to control an autopiloted ground-based robotic complex employed for transportation during emergency rescue operations under difficult natural and climatic conditions of the Arctic region. The universal nature of the proposed method is shown. An approach to finding a solution to the optimization problem using the necessary optimality conditions in the form of the Pontryagin maximum principle and the method of rapid automatic differentiation is described. A problem-oriented software product has been created, which is based on the developed computational algorithm for constructing approximate optimal control. The results obtained from numerical experiments confirm the effectiveness of the developed algorithm in finding an approximate optimal solution to the problem under consideration. The created software tool can be used to train an ANN with dynamics described by a system of differential equations with consideration to delays. The proposed mathematical model of ANN is suitable to solving a wide range of applied robotics tasks, including those aimed at developing technical means for emergency rescue operations under difficult natural and climatic conditions of the Arctic region. The flexibility, stability and adaptability of the selected model to changes in input parameters determine the prospects of using the developed computational algorithm to solve control problems in complex technical systems.

**Keywords:** robotics, emergency rescue operations, optimal control problem, maximum principle, artificial neural network training, safety.

**For citation:** Tsarkova E.G., Kalach A.V., Bobrov V.N. Neural network model of robotic complex control during emergency rescue operations under the conditions of the Far North. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1291> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.010 (In Russ.).

## Введение

Сегодня усложнение геополитической обстановки и усиление криминогенных, террористических угроз приводит к необходимости освоения новых территорий, в том числе, Севера России. Уголовно-исполнительная система в настоящее время становится одним из активных участников данного направления развития арктических территорий, в частности, за счет создания новых исправительных учреждений (колоний-поселений) в таких регионах. Развитие и внедрение робототехнических систем на основе искусственного интеллекта предоставляет возможность даже на критически важных и ответственных направлениях в экстремальных природно-климатических условиях обходиться без участия человека. Для разработки таких роботизированных систем высокую эффективность демонстрируют подходы, основанные на применении искусственных нейронных сетей (ИНС). В работе осуществляется разработка нейросетевой модели управления автопилотируемым наземным роботизированным комплексом, предназначенным для выполнения перевозок при проведении аварийно-спасательных работ в экстремальных условиях. Искусственные нейронные сети находят применение в самых различных сферах производства, экономики, управления и, в том числе, при создании систем автопилотирования [1-4]. Целью исследования является рассмотрение процесса обучения ИНС, используемой для управления передвижением наземного роботизированного комплекса (РК) с дифференциальным приводом колес, используемого для перевозок при проведении аварийно-спасательных работ в условиях крайнего севера. При управлении техническими системами эффективно применение динамических нейронных сетей, отличающихся от статических ИНС возможностью адаптации структуры сети к изменениям входных параметров (внешних условий). Такая адаптация осуществляется путем реализации процесса обучения на новых данных. Кроме того, поскольку в сложных технических системах неизбежно возникновение запаздываний, обусловленных в том числе, временными задержками при передаче

управляющих сигналов к исполнительным механизмам, при обучении рассматриваемой ИНС необходим учет запаздываний. В настоящее время достаточно полно исследованы задачи с наличием запаздываний в функциях состояния [5, 6]. Вместе с тем, для управления РК необходимо использовать ИНС со сложной архитектурой, обучение которой сводится к решению задачи оптимального управления с запаздываниями как в функции управления, так и в функциях состояния. При этом требуется разработка новых численных методов для решения данной задачи. Вышеизложенные факторы обосновывают новизну, актуальность и практическую значимость исследования.

### Теоретический анализ

Рассматривается ИНС, предназначенная для управления автопилотируемым наземным РК при объезде препятствий. В техническом комплексе реализуется возможность обратной связи, позволяющей корректировать направление его движения. Предусмотренная в РК возможность автоматического определения расстояния до возникающих препятствий делает возможным автоматическое управление направлением движения и значением линейных скоростей, соответствующих левому и правому приводу технической системы. Значения указанных параметров образуют выходной слой нейронов сети. Входными параметрами (нейронами входного слоя) служат характеристики расположения препятствий и коэффициент ускорения РК. Построим математическую модель обучения ИНС, состоящей из  $N$  нейронов. В качестве универсального средства, обеспечивающего возможность построения ИНС в условиях отсутствия исчерпывающих априорных знаний относительно обрабатываемых данных используется модель осцилляторной нейронной сети, включающей нейроны, имеющие возбуждающие и тормозящие связи, благодаря чему для описания суммарной активности нейронов может быть использована модель колебательного процесса. Изменение состояния нейронной сети описывается дифференциальными уравнениями (ДУ) с запаздываниями следующего вида [7, 8]:

$$\ddot{x}_i(t) + \varepsilon(1 - \beta_i x_i^2(t)) + v_i^2 x_i(t) = u_i(t) + \sum_{j=1}^N w_{ij}(t) (\dot{x}_j(t - h_j) - \dot{x}_i(t)), \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, N, t \in [0, T].$$

Введем обозначения:  $\dot{x}_i(t) = y_i(t)$ ,  $z_j(t) = y_j(t - h_j)$ ,  $i, j = 1, \dots, N, t \in [0, T]$ . Получаем:

$$\dot{x}_i(t) = y_i(t), \quad j = \overline{1, N}, t \in [0, T], \quad (2)$$

$$\dot{y}_i(t) = -v_i^2 x_i(t) - \varepsilon(1 - \beta_i x_i^2(t)) + u_i(t) + \sum_{j=1}^N w_{ij}(t) (y_j(t - h_j) - y_i(t)).$$

Определены состояния нейронов и внешние воздействия на систему в начальный период времени:

$$x_i(0) = a_i, \quad \dot{x}_i(t) = \varphi_i(t), \quad i = \overline{1, N}, t \in [-\max\{h_j\}, 0], \quad (3)$$

$$u_i(t) = \psi_i(t), \quad i = \overline{1, N}, t \in [-\max\{h_j\}, 0],$$

где  $\varphi_i(t), \psi_i(t)$  – заданные функции. На величину управляющего воздействия накладываются ограничения следующего вида:

$$|u_i(t)| < B_i, |w_{ij}(t)| < C_{ij}. \quad (4)$$

Здесь  $N$  – количество нейронов скрытого слоя,  $T$  – время процесса,  $x_i(t)$  – величина, характеризующая амплитуду колебания  $i$ -го нейрона, изменяющейся со скоростью  $y_i(t)$ . Введены параметры  $\varepsilon > 0, \beta$ , характеризующие величину суммарного воздействия на  $i$ -ый нейрон со стороны ансамбля нейронов. Частота колебания  $i$ -го нейрона равна  $v_i$ . Для определения структуры архитектуры сети используются значения весовых коэффициентов ансамбля нейронов  $w_{ij}(t)$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ , а также функций управления  $u_i(t), i = \overline{1, N}$ , определяющих силу внешнего воздействия на совокупность нейронов. Обучение ИНС сводится к построению оптимального управления ансамблем нейронов для заданного целевого функционала. При этом требуется учет терминальных условий, согласно которым характеристики ИНС в конечный момент времени достигают заданных значений. Получаем задачу оптимального управления следующего вида.

Требуется минимизировать функционал:

$$I(u) = M \int_0^T f_0(t, x(t), u(t), w(t)) dt + M_3 \Phi(x(T)) \rightarrow \inf \quad (5)$$

при ограничениях (2) – (4), где  $M_1, M_2, M_3$  – весовые коэффициенты.

$$\text{Пусть } f_0(t, x(t), u(t), w(t)) = M_1 \sum_{i=1}^N u_i^2(t) + M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t), \quad \Phi(x(T)) = \sum_{i=1}^N (x_i(T) - A_i)^2.$$

Тогда

$$I(u) = \int_0^T \left( M_1 \sum_{i=1}^N u_i^2(t) + M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t) \right) dt + M_3 \sum_{i=1}^N (x_i(T) - A_i)^2 \rightarrow \inf. \quad (6)$$

В соотношении (6) сумма при  $M_1$  выражает значение величины энергии, поступающей в сеть в результате внешних воздействий; значение выражения при  $M_2$  равно величине собственной энергии ИНС; последний член суммы целевого функционала с коэффициентом  $M_3$  введен для учета выполнения терминального условия.

Для решения задачи применим необходимые условия оптимальности, сформулированные в виде принципа максимума Понтрягина [7, 8]. Функция Понтрягина рассматриваемой задачи имеет вид:

$$H(\lambda_0, x, y, z, p(t), q(t), u, w) = -\lambda_0 M_1 \sum_{i=1}^N u_i^2(t) - \lambda_0 M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t) + \sum_{i=1}^N p_i(t) y_i + \\ + \sum_{i=1}^N q_i(t) \left( -(v_i)^2 x_i - \varepsilon (1 - \beta_i x_i^2) + u_i + \sum_{j=1}^N w_{ij} (z_j - y_i) \right),$$

где  $z_j(t) = y_i(t - h_j), i, j = 1, \dots, N, t \in [0, T], p(t), q(t)$  – сопряженные вектор-функции.

Строим сопряженную систему для задачи с запаздывающим аргументом:

$$-\lambda_0 \left( M_1 \sum_{i,j=1}^N u_i^2(t) + M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t) \right) + \sum_{i=1}^N p_i(t) y_i + \\ + \sum_{i=1}^N q_i(t) \left( -v_i^2 x_i - \varepsilon (1 - \beta_i x_i^2) + u_i + \sum_{j=1}^N w_{ij} (z_j - y_i) \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^N p_i(t) \bar{y}_i + \sum_{i=1}^N q_i(t) \left( -v_i^2 \bar{x}_i - \varepsilon (1 - \beta_i x_i^2) \right) + \max_{u \in U} \left[ -\lambda_0 M_1 \sum_i u_i^2(t) + \sum_{i,j=1}^N q_i(t) u_i \right] +$$

$$+ \max_{w \in W} \left[ -\lambda_0 M_2 \sum_i w_{ij}^2(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( q_i(t) w_{ij} (\bar{z}_j - \bar{y}_i) \right) \right].$$

Построим приближенное численное решение с использованием дискретной аппроксимации рассматриваемой задачи [9, 10]. Вводим на интервале  $[0, T]$  равномерную сетку, разбивая его на  $q$  слоев. С применением схемы Эйлера второго порядка точности и формулы левых прямоугольников приходим к дискретной задаче оптимального управления следующего вида:

$$I(u, w) = \left( M_1 \sum_{i=1}^N (u^i)^2 + M_2 \sum_{i,j=1}^N (w^{ij})^2 \right) \Delta t + M_2 \Phi(x^q) \rightarrow \inf, \quad (7)$$

$$x_i^{l+1} = x_i^l + \Delta t y_i^l, i = \overline{1, N}, l = \overline{1, q}, \quad (8)$$

$$y_i^{l+1} = y_i^l + \Delta t \left( -(v_i^l)^2 x_i^l - \varepsilon (1 - \beta_i (x_i^l)^2) + u_i^l + \sum_{j=1}^N w_{ij}^l (y_j^{l-\tau_j} - y_i^l) \right), \quad (9)$$

$$x_i^0 = a_i, y_i^l = \varphi_i^l, l \in [-\max\{v_j\}, 0], |u_i^l| < B_i. \quad (10)$$

В рассматриваемой модели индекс  $i = \overline{1, N}$  служит для определения порядкового номера координаты вектора. Номер слоя нейронной сети обозначается в верхнем индексе символом  $l$ . В [8] обосновано применение метода быстрого автоматического дифференцирования (БАД) при решении дискретных задач оптимального управления (ДЗОУ). Для построения приближенного численного решения рассматриваемой ДЗОУ применена комбинация метода БАД с численным методом проекции градиента. На Рисунке 1 представлена схема разработанного вычислительного алгоритма.

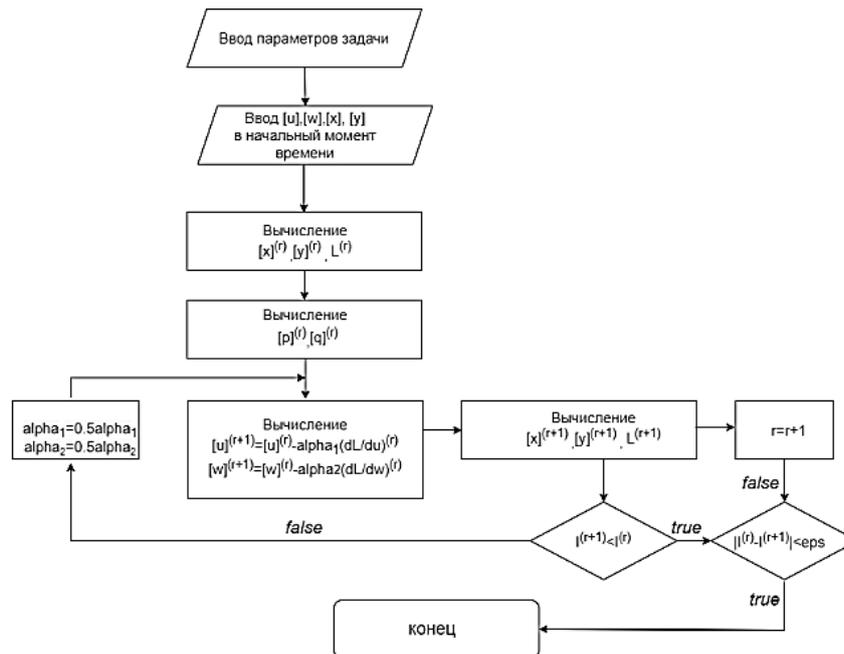


Рисунок 1 – Схема алгоритма построения численного решения задачи  
Figure 1 – Scheme of the algorithm for constructing a numerical solution to the problem

### Экспериментальная часть

Авторами в среде IDE Lazarus разработана программа, реализующая вычислительный алгоритм нахождения приближенного оптимального решения полученной ДЗОУ.

Вычисления проведены при  $M_1 = M_2 = M_3 = 1000$ . Для достижения заданной точности ( $eps = 10^{-6}$ ) алгоритмом выполнено 13957 итераций. Графики функций состояния и весовые коэффициенты, полученные в результате вычислений, представлены на Рисунках 2-4.

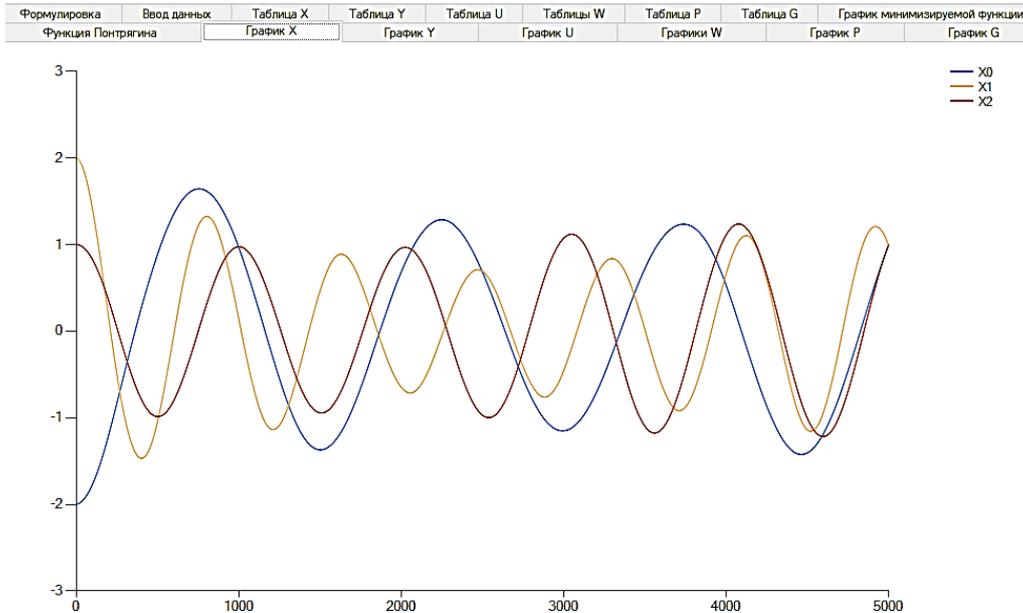


Рисунок 2– Графики функций состояния ( $M_2 = 1000$ )

Figure 2 – Graphs of state functions ( $M_2 = 1000$ )

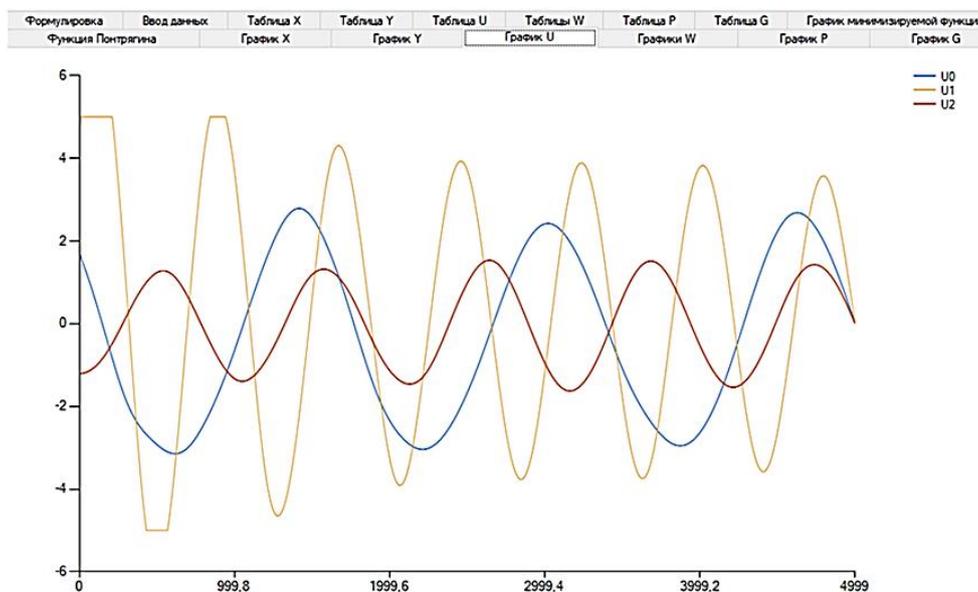


Рисунок 3 – Графики управлений  $u$

Figure 3 – Control graphs  $u$

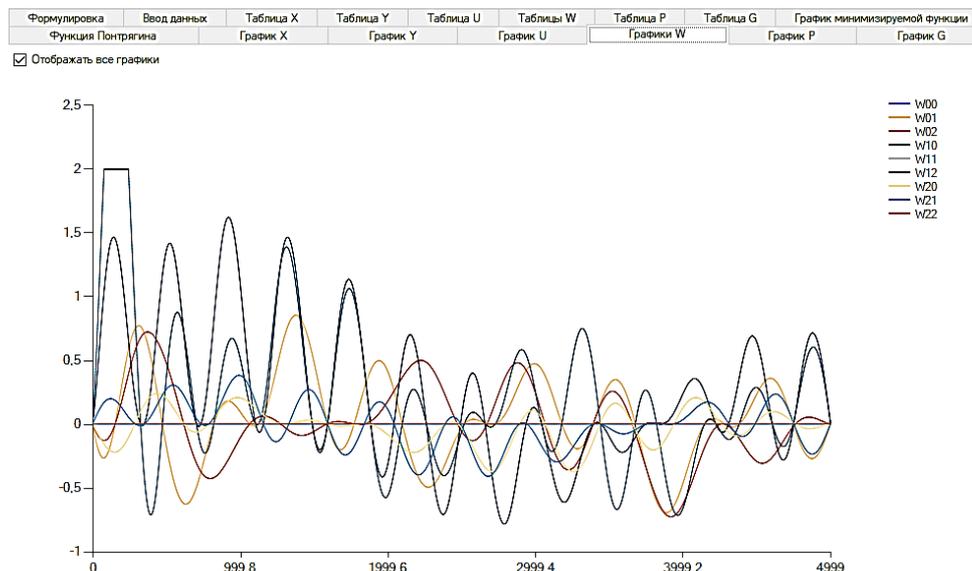


Рисунок 4 – Значения весовых коэффициентов  $w$   
Figure 4 – Values of weight coefficients  $w$

### Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм построения приближенного решения задачи оптимального управления обеспечивает возможность реализации процесса обучения ИНС, динамика которой описывается системой ДУ с запаздываниями в функциях управления и состояния. Полученная динамическая модель ИНС применима при решении широкого круга прикладных задач робототехники, в том числе, направленных на разработку автопилотируемых технических комплексов, предназначенных для оказания помощи при проведении аварийно-спасательных работ в сложных природно-климатических условиях Арктического региона. Гибкость, устойчивость и адаптивность выбранной модели к изменению входных параметров обуславливают перспективность применения разработанного вычислительного алгоритма для решения задач управления сложными техническими системами.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахтинова Ч.О., Чунаева М.Э. Автоматизация системы контроля качества при организации строительства особо опасных и технически сложных объектов в России. *Инженерный вестник Дона*. 2022;3. Доступно по: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7511> (дата обращения: 25.11.2022).
2. Душкин А.В., Цветков В.В. Вопросы моделирования состояний инженерно-технических средств охраны и надзора. *Вестник Воронежского института ФСИИ России*. 2014;3:28–31.
3. Сумин В.И., Чураков Д.Ю., Царькова Е.Г. Разработка моделей и алгоритмов информационных структур и процессов объектов особой важности. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2019;4:30–39.
4. Каяшев А.И., Рахман П.А., Шарипов М.И. Анализ показателей надежности локальных компьютерных сетей. *Вестник УГАТУ*. 2013;5:140–149.
5. Болодурина И.П., Огурцова Т.А., Арапова О.С., Иванова Ю.П. *Теория оптимального управления*. Оренбург: Оренбургский государственный университет; 2016. 147 с.

6. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y., Andreeva E. Technical Diagnostics of Equipment Using Data Mining Technologies. *Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century»*. Cham: Springer. 2022:345–356. Available by: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9\\_30](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30) (accessed on 26.11.2022).
7. Шанин Д.А., Чикин В.В. Нейросетевой адаптивный контроллер для задачи управления объектом с неизвестной структурой посредством глобальной обратной связи. *Инженерный вестник Дона*. 2008;2. Доступно по: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/60> (дата обращения: 25.11.2022).
8. Евтушенко Ю.Г. *Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации*. Москва; 1982. 432 с.
9. Dushkin A.V., Kasatkina T.I., Novoseltsev V.I., Ivanov S.V. An improved method for predicting the evolution of the characteristic parameters of an information system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;973(1):012031. Available by: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1003/1/012012/meta> (accessed on 26.11.2022).
10. Dubrovin A.S., Ogorodnikova O.V., Tsarkova E.G., Andreeva E.A., Kulikova T.N. Analysis and visualization in graph database management systems. *Journal of Physics: Conference Series: Current Problems*. 2021;1902(1):012059. Available by: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012059> (accessed on 26.11.2022).

## REFERENCES

1. Bahtinova Ch.O., Chunaeva M.E. Avtomatizatsiya sistemy kontrolya kachestva pri organizatsii stroitel'stva osobo opasnykh i tekhnicheskikh slozhnykh ob'yektov v Rossii. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2022;3. (In Russ.). Available by: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7511> (accessed on 26.11.2022).
2. Dushkin A.V., Cvetkov V.V. Voprosy modelirovaniya sostoyaniy inzhenerno-tekhnicheskikh sredstv okhrany i nadzora. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service*. 2014;3:28–31. (In Russ.).
3. Sumin V.I., Churakov D.yu., Car'kova E.G. Razrabotka modeley i algoritmov informatsionnykh struktur i protsessov ob'yektov osoboy vazhnosti. *Promyshlennye ASU i kontroly Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2019;4:30–39. (In Russ.).
4. Kayashev A.I., Rahman P.A., Sharipov M.I. Analiz pokazateley nadezhnosti lokal'nykh komp'yuternykh setey. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013;5:140–149. (In Russ.).
5. Bolodurina I.P., Ogurcova T.A., Arapova O.S., Ivanova Yu.P. *Teoriya optimal'nogo upravleniya*. Orenburg: Orenburgskij gosudarstvennyj universitet; 2016. 147 p. (In Russ.).
6. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y., Andreeva E. Technical Diagnostics of Equipment Using Data Mining Technologies. *Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century»*. Cham: Springer. 2022:345–356. Available by: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9\\_30](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30) (accessed on 26.11.2022).
7. Shanin D.A., Chikin V.V. Nejrosetevoy adaptivnyj kontroller dlya zadachi upravleniya ob'ektom s neizvestnoj strukturoj posredstvom global'noj obratnoj svyazi. *Inzhenernyj*

- vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2008;2. (In Russ.). Available by: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/60> (accessed on 26.11.2022).
8. Evtushenko Yu.G. *Metody resheniya ekstremal'nykh zadach i ih primenenie v sistemah optimizatsii*. Moscow; 1982. 432 p. (In Russ.).
  9. Dushkin A.V., Kasatkina T.I., Novoseltsev V.I., Ivanov S.V. An improved method for predicting the evolution of the characteristic parameters of an information system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;973(1):012031. Available by: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1003/1/012012/meta> (accessed on 26.11.2022).
  10. Dubrovin A.S., Ogorodnikova O.V., Tsarkova E.G., Andreeva E.A., Kulikova T.N. Analysis and visualization in graph database management systems. *Journal of Physics: Conference Series: Current Problems*. 2021;1902(1):012059. Available by: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012059> (accessed on 26.11.2022).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Царькова Евгения Геннадьевна**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник центра изучения проблем управления и организации исполнения наказаний в уголовно-исполнительной системе, Научно-исследовательский институт ФСИН России, Москва, Российская Федерация.

*e-mail*: [Tsarkova.EG@tversu.ru](mailto:Tsarkova.EG@tversu.ru)

**Evgeniya Gennadievna Tsarkova**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow at Research Center of Problems of Management and Organization of Execution of Punishments in the Penal System, Research Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Moscow, Russian Federation.

**Калач Андрей Владимирович**, доктор химических наук, профессор, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail*: [a\\_kalach@mail.ru](mailto:a_kalach@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-8926-3151](https://orcid.org/0000-0002-8926-3151)

**Andrey Vladimirovich Kalach**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Security and Protection of Information Constituting a State Secret of Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation.

**Бобров Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, начальник факультета подготовки кадров высшей квалификации, Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail*: [bvn280167@rambler.ru](mailto:bvn280167@rambler.ru)

**Vladimir Nikolaevich Bobrov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Faculty of Training Highly Qualified Personnel of Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 12.12.2022; одобрена после рецензирования 27.01.2023; принята к публикации 10.01.2023.*

*The article was submitted 12.12.2022; approved after reviewing 27.01.2023; accepted for publication 10.01.2023.*