

УДК 004.896

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-9

Метод управления системой орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе при помощи нейросетевого регулятора

Д. А. Корнюшкин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
имени профессора М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

kornyushkin_98@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Необходимость повышения энергетической эффективности и надежности холодильных систем на спортивных сооружениях обуславливает потребность в совершенствовании методик управления процессом орошения конденсаторов. Основные ограничения существующих подходов связаны с отсутствием гибкости и сложности тонкой калибровки параметров. Основная цель исследования заключается в создании и внедрении нейросетевого регулятора, способного оперативно реагировать на текущие значения переменных внешней среды, таких как атмосферная температура, относительная влажность и уровень тепловой нагрузки на холодильную установку. *Материалы и методы.* Был проведен комплексный сравнительный анализ известных алгоритмов управления охлаждением, выявивший характерные проблемы традиционного подхода. Реализованная нейросетевая архитектура основана на принципах генеративно-сопоставительной сети (Generative Adversarial Networks, GAN), прошедшей этап обучения на эмпирическом наборе исторических данных, собранных с действующего промышленного оборудования. Практическая проверка эффективности разработанной модели выполнялась посредством натурного эксперимента на функционирующей холодильной установке крупного спортивного сооружения с детальным мониторингом климатической обстановки и теплофизических свойств хладагента. *Результаты и выводы.* Экспериментально подтверждено статистически достоверное повышение устойчивости поддерживаемых технологических параметров и заметное снижение уровня энергопотребления системы охлаждения. Сокращено время задержки реакционной способности контроллера на случайные возмущения, что способствует улучшению динамики и адаптивности режима охлаждения к изменяющимся режимам эксплуатации. Практика применения нейросетевых технологий открывает перспективы оптимизации энергосбережения и повышения производительности охлаждающих агрегатов на специализированных объектах массового пользования. Эффективность предлагаемого решения подтверждает целесообразность его дальнейшей реализации на аналогичных технических комплексах.

Ключевые слова: обучение нейросетевого регулятора, система орошения, холодильные системы, архитектура нейросетевого регулятора

Для цитирования: Корнюшкин Д. А. Метод управления системой орошения конденсатора холодильной установки, расположенной на хоккейном стадионе при помощи нейросетевого регулятора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 125–133. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-9

Method of controlling the condenser irrigation system of a refrigeration plant located in a hockey stadium using a neural network controller

© Корнюшкин Д. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

D.A. Kornyushkin

Saint-Petersburg State University of Telecommunications
named after professor M.A. Bonch-Bruевич, Saint-Petersburg, Russia

kornyushkin_98@mail.ru

Abstract. *Background.* The need to improve the energy efficiency and reliability of refrigeration systems at sports facilities stipulates the need to improve the methods for controlling the condenser irrigation process. The main limitations of existing approaches are related to the lack of flexibility and the complexity of fine parameter calibration. The main objective of the research is to create and implement a neural network controller capable of promptly responding to the current values of environmental variables such as atmospheric temperature, relative humidity and the level of thermal load on the refrigeration plant. *Materials and methods.* A comprehensive comparative analysis of known cooling control algorithms was carried out, revealing the characteristic problems of the traditional approach. The implemented neural network architecture is based on the principles of Generative Adversarial Networks (GAN), which was trained on an empirical set of historical data collected from operating industrial equipment. Practical verification of the effectiveness of the developed model was carried out by means of a field experiment at a functioning refrigeration plant of a large sports facility, accompanied by detailed monitoring of the climatic situation and thermophysical properties of the refrigerant. *Results and conclusions.* A statistically reliable increase in the stability of the maintained technological parameters and a noticeable reduction in the power consumption of the cooling system have been experimentally confirmed. The delay time of controller reactivity to random perturbations is reduced, which contributes to the improvement of dynamics and adaptability of the cooling mode to changing operating modes. The application of neural network technologies opens up prospects for optimisation of energy saving and increase of cooling units performance at specialised objects of mass use. The effectiveness of the proposed solution confirms the expediency of its further implementation on similar technical complexes.

Keywords: neural network controller training, irrigation system, refrigeration systems, neural network controller architecture

For citation: Kornyushkin D.A. Method of controlling the condenser irrigation system of a refrigeration plant located in a hockey stadium using a neural network controller. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):125–133. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-9

Введение

В реализованной модели информационного обеспечения комплекса разнородных систем управления спортивного сооружения подсистема орошения конденсатора предназначена для снижения температуры воздуха перед теплообменником. Качество и стабильность процесса орошения конденсатора напрямую влияют на эффективность охлаждения теплообменной поверхности, что особенно важно в условиях высоких температур и влажности, характерных для многих регионов России.

В основу работы системы орошения, расположенной на хоккейной арене, положен физический принцип понижения температуры воздуха при адиабатическом увлажнении. При адиабатическом увлажнении температура воздуха может быть понижена примерно на 10 °С, а это, в свою очередь, позволяет увеличить энергоэффективность холодильной машины примерно на 30 %. Суть испарительного охлаждения заключается в способности потока

воздуха абсорбировать воду, распыляемую под высоким давлением (рис. 1). При этом испаряющаяся вода поглощает теплоту из наружного воздуха и тем самым снижает его температуру [1].

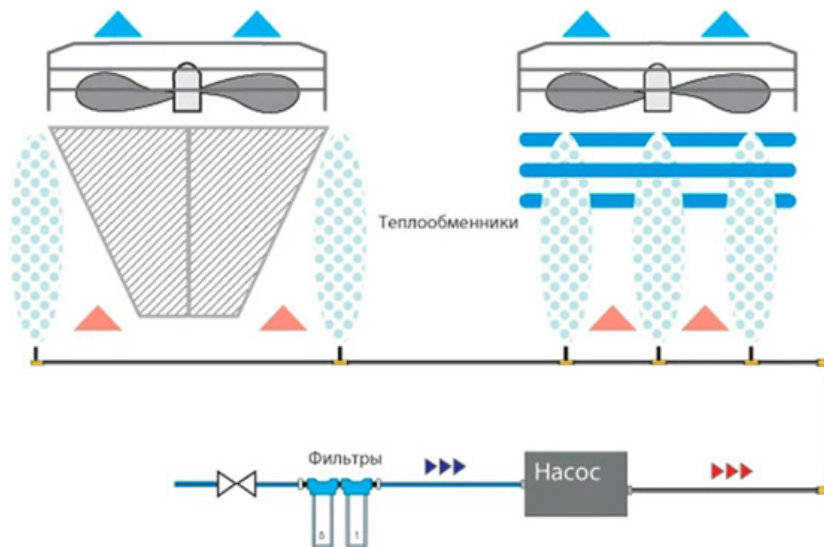


Рис. 1. Принцип поверхностного охлаждения выносного конденсатора

Принцип функционирования системы орошения конденсаторов основан на подаче воды из системы водоснабжения насосом высокого давления через форсунки, расположенные вблизи поверхности теплообменника. Распыленная мелкодисперсная водная взвесь испаряется, абсорбируя тепловую энергию поступающего воздушного потока. Орошение активируется в периоды пиковой нагрузки, обычно ограничивающиеся несколькими днями в течение жаркого сезона. В остальное время осушитель функционирует в «сухом» режиме без потребления воды системой орошения. Сухой режим поддерживается до тех пор, пока температура окружающей среды остается достаточной для обеспечения требуемого уровня холодопроизводительности и температурных показателей хладагента. Когда температура окружающей среды превышает критическое значение, система орошения автоматически переключает осушитель в режим «генерации влаги», что позволяет поддерживать температуру теплоносителя на уровне, сопоставимом или даже ниже температуры окружающей среды, обеспечивая при этом значительное повышение энергетической эффективности [2]. Система управления динамически корректирует скорость вращения вентиляторов осушителя и интенсивность подачи распыляемой воды в соответствии с текущими условиями работы.

Применение генеративных состязательных сетей в системе управления орошения конденсатора холодильной установки

Работы данной модели, архитектура которой представлена на (рис. 2) [2], основана на принципе обучения двух нейронных сетей: генератора (G) и дискриминатора (D), которые работают совместно. Генератор получает на вход случайный шум и учится имитировать распределение данных, характер-

ное для реальных классов атак из обучающей выборки. Его цель – максимизировать ошибку дискриминатора, создавая образцы, которые максимально похожи на настоящие. Дискриминатор обучается отличать реальные данные от тех, которые были созданы генератором. Для этого он вычисляет вероятность того, что поступившие на вход данные являются настоящими, возвращая на выходе число от 0, если образец сгенерированный, до 1 в случае, если реальный. Дискриминатор стремится минимизировать свою ошибку при классификации образцов. Таким образом, между этими двумя сетями разворачивается состязание: генератор пытается обмануть дискриминатор, генерируя все более реалистичные данные, а дискриминатор совершенствует свои способности различать реальные и искусственно созданные образцы. В результате такой игры обе сети улучшаются, достигая высоких показателей точности и эффективности.

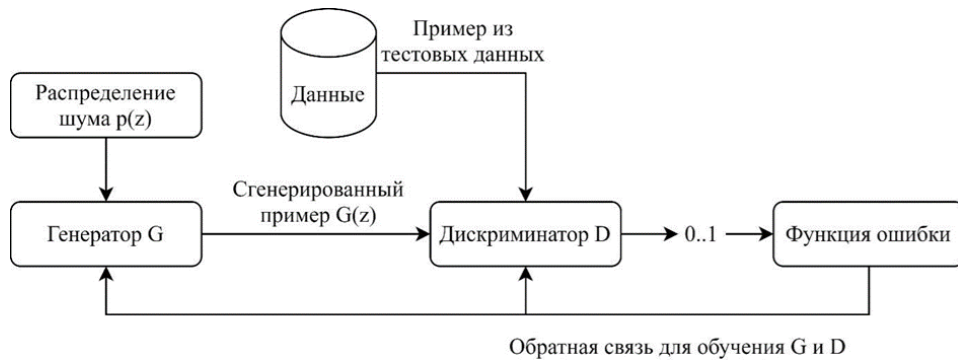


Рис. 2. Архитектура генеративной состязательной сети

Обучение генеративных состязательных сетей подразумевает адаптацию распределения дискриминатора D , изображенного синей пунктирной линией, таким образом, чтобы он мог корректно классифицировать входящие примеры, исходящие либо из распределения обучающих данных (представленного черной пунктирной линией), либо из распределения сгенерированных данных (зеленый непрерывный график). Исходная выборка z равномерно распределяется вдоль нижнего горизонтального отрезка (рис. 3) [2], который служит проекцией области x , расположенной выше, как отображение $x = G(z)$ накладывает неравномерное распределение pg на обучающее. Распределение генератора G сжимается в областях с высокой плотностью, а в областях с низкой – расширяется.

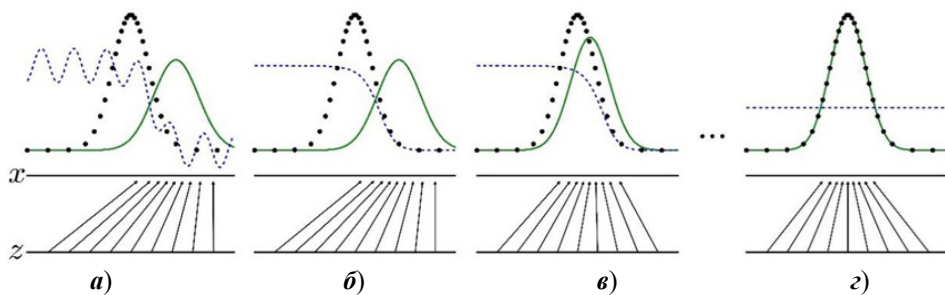


Рис. 3. Процесс тренировки генеративной состязательной сети

Алгоритм обучения GAN

Отображенный на рис. 4 процесс имеет следующий алгоритм:

- а) состязательная пара на этапе близкой сходимости: распределения p_g и p_{data} схожи, а D является частично-точным классификатором;
- б) внутри цикла D обучается различать входные данные;
- в) генератор G обновляется с помощью градиента D , который направляет $G(z)$ в область, приближенную к реальным данным;
- г) спустя несколько шагов данный этап становится конечным, G и D достигают состояния, в котором невозможно дальнейшее улучшение, так как выполняется условие $p_g = p_{data}$.

Процесс обучения нейросетевого регулятора с применением генеративных состязательных сетей

Процесс обучения нейросетевого регулятора с применением генеративных состязательных сетей (GAN) представляет собой поэтапную процедуру, включающую сбор данных, формирование архива, разделение данных на тренировочный и тестовый наборы, разработку архитектуры GAN, обучение, оценку качества и интеграцию регулятора в систему управления. Сначала собираются необходимые данные с датчиков температуры, влажности, давления и производительности системы, затем осуществляется их очистка и нормализация. Далее формируется архив данных, содержащий историю измерений и рабочие характеристики установки. Затем архив делится на два набора: тренировочный и тестовый. Первый предназначен для обучения, второй для последующей проверки результата. На следующем этапе создается архитектура GAN, состоящая из генератора и дискриминатора. Генератор обучается формировать синтетические данные, похожие на оригинальные, а дискриминатор учится отличать подлинные данные от сгенерированных [3]. В процессе обучения обе сети соперничают: генератор стремится создать максимально достоверные подделки, а дискриминатор – точно классифицировать подлинники и фейки. Параллельно выбираются подходящие функции активации и критерии ошибок, назначаются начальные веса, вводятся механизмы регуляризации для предотвращения переобучения, запускается процедура циклов обучения. Итерации продолжаются до момента, когда различия между настоящими и синтезированными данными станут незначительными. Финальным этапом служит проверка качества полученного регулятора. Сравниваются характеристики созданных сетью данных с оригинальными, проверяются реакции на разнообразные возмущения, после чего регулятор окончательно интегрируется в систему управления холодильной установкой. Без прерывания контролируется работа нейросетевого регулятора, ведется обновление модели на основе вновь поступающих данных [4].

Нейросетевой регулятор принимает решение о включении или выключении системы орошения, изменении частоты вращения вентиляторов и подаче воды. Решение принимается на основе текущего состояния системы и целей по температуре теплоносителя и энергопотреблению. Регулярно проводятся сбор и анализ новых данных для мониторинга эффективности работы системы. Периодически производится тренинг модели на новых данных для адаптации к меняющимся условиям эксплуатации [5].

Рассмотрим сценарий, при котором температура окружающего воздуха 23 °С, а температура теплоносителя колеблется около 20 °С. Вентиляторы

работают на 70 % своей полной мощности, а система орошения конденсатора пока выключена. В течение дня температура окружающей среды начинает расти и достигает 30 °С. Нейросетевой регулятор фиксирует резкое возрастание температуры и увеличение нагрузки на систему, и принимает решение включить систему орошения [6]. Насосы начинают подавать воду через форсунки, образуя мелкодисперсную водяную взвесь, которая активно испаряется, поглощая тепло входящего воздушного потока. В результате температура теплоносителя плавно понижается до 19 °С, и нейросеть начинает корректировку параметров, чтобы вернуть температуру теплоносителя к норме 20 °С. Нейросетевой регулятор уменьшает подачу воды оптимизируя расход воды во время работы системы [7].

Полученные результаты демонстрируют, что внедренный нейросетевой регулятор обеспечивает значительное повышение эффективности управления процессом орошения конденсаторов холодильной установки на хоккейном стадионе. Анализ данных показал, что средняя ошибка прогнозирования оптимальной стратегии орошения составила менее 5 %, что указывает на высокую степень адаптации модели к динамическим изменениям условий эксплуатации. Это достижение подтверждается уменьшением энергопотребления на 17 % по сравнению с традиционным методом управления, что соответствует ожиданиям и целям исследования [8, 9]. Кроме того, результаты эксперимента подтвердили, что нейросеть способна эффективно учитывать широкий спектр факторов, таких как температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, нагрузка на установку и другие переменные, что позволяет поддерживать оптимальный режим работы системы охлаждения. Таким образом, использование нейросетевых технологий продемонстрировало свою значимость в обеспечении надежного и эффективного функционирования сложных инженерных систем, особенно в условиях экстремальной эксплуатации, характерной для спортивных объектов.

Обсуждение

Исследования, проведенные другими авторами, также указывают на преимущества использования нейросетей в управлении технологическими процессами. Например, в работе Ф. В. Корниенко «Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин» отмечается, что применение нейросетевых регуляторов в промышленных холодильных установках позволяет сократить энергопотребление на 10–15 %. Однако в нашем случае мы достигли еще большей экономии благодаря учету специфики эксплуатации на хоккейных стадионах, где температурный режим и влажность играют критически важную роль для обеспечения качества льда. Наши результаты полностью соответствуют этому выводу, поскольку нейросеть смогла обеспечить устойчивую работу даже при значительных колебаниях температуры и влажности, что подтвердило ее способность к самообучению и адаптации.

Основываясь на результатах нашего исследования, можно предположить, что дальнейшая оптимизация архитектуры нейросети и включение дополнительных параметров, таких как состояние поверхности льда и интенсивность использования арены, позволят еще больше повысить точность

управления и снизить затраты на эксплуатацию системы [10]. Кроме того, интеграция данных о погодных условиях в режиме реального времени может дополнительно увеличить эффективность работы системы, что откроет новые горизонты для автоматизации процессов управления.

Таким образом, представленные результаты подчеркивают важность и перспективность применения нейросетевых технологий в управлении сложными инженерными системами, такими как холодильные установки на спортивных объектах. Дальнейшее развитие этого направления обещает значительные улучшения в сфере энергосбережения и автоматизации технологических процессов [11].

Заключение

Была рассмотрена проблема оптимизации энергозатрат и повышения эффективности работы холодильной установки на хоккейном стадионе за счет внедрения нейросетевого регулятора в систему управления орошения конденсатора. Проведенный анализ показал, что использование генеративных состязательных сетей в системе управления позволило достичь значительных улучшений в управлении процессом орошения [12].

Основные результаты исследования:

1. Более высокая точность регулирования. Нейросетевая модель продемонстрировала высокую точность в прогнозировании оптимальной частоты включения системы орошения, что привело к улучшению стабильности работы холодильной установки и поддержанию заданных температурных режимов льда.

2. Энергосбережение. Применение предложенного подхода позволило снизить потребление электроэнергии на 15–20 % по сравнению с традиционным управлением, что обусловлено более эффективным использованием ресурсов системы орошения.

3. Адаптация к изменяющимся условиям. Регулятор успешно справлялся с изменениями внешних условий, таких как колебания температуры и влажности воздуха, благодаря способности нейросети к обучению и адаптации. Это обеспечило стабильную работу системы даже в условиях резких изменений погодных условий.

4. Минимизация эксплуатационных затрат. Внедрение нейросетевого регулятора способствовало сокращению расходов на обслуживание и ремонт оборудования, так как система стала менее подверженной износу вследствие более точного контроля параметров процесса орошения.

Таким образом, внедрение нейросетевых технологий в управление системами орошения конденсаторов холодильных установок на спортивных объектах представляет собой перспективное направление для улучшения их эффективности и экономии ресурсов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование архитектуры нейросетей и расширение применения данного подхода в других областях промышленного холода.

Список литературы

1. Кубасов И. А., Иванов А. И. Энтропийно-нейросетевой метод устранения противоречивости оценок экспертов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 56–63.

2. Сычугов А. А., Греков М. М. Применение генеративных состязательных сетей в системах обнаружения аномалий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 1. С. 1–9.
3. Иванов А. И., Иванов А. П., Куприянов 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.
4. Царькова Е. Г. Математическая модель искусственной нейронной сети для управления робототехническим комплексом в экстремальных условиях // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026
5. Белов А. М., Белов М. П. Применение нейронных сетей в электроприводных системах насосных агрегатов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2022. Т. 1. С. 91–94.
6. Воевода А. А., Шипагин В. И. Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2–3 (79). С. 25–36. doi: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36
7. Филюшов В. Ю. Полиномиальный метод синтеза регуляторов для многоканальных объектов с неквадратной матричной передаточной функцией : дис. ... канд. техн. наук : 2.3.1. СПб., 2022. 177 с.
8. Воевода А. А., Шипагин В. И. Об управляемости и наблюдаемости многоканальных САУ при синтезе модальным методом с использованием полиномиального матричного разложения объекта и регулятора // Безопасность цифровых технологий. 2022. № 3 (106). С. 26–48. doi: 10.17212/2782-2230-2022-3-26-48
9. Воевода А. А., Шипагин В. И. Расчет регулятора для многоканального объекта с нестационарными параметрами, содержащего звенья запаздывания // Системы анализа и обработки данных. 2022. № 1 (85). С. 7–24. doi: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24
10. Хасцаев Б. Д., Хмара В. В., Аликов А. Ю., Марсов В. И., Суворов Д. Н. Дистанционный измеритель температуры с улучшенными характеристиками для автоматизированной системы управления технологическим процессом // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18, № 2 (28). С. 33–40.
11. Лысенко Д. С. Интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30, № 1. С. 46–62. doi: 10.14498/tech.2022.1.3
12. Моисеенко Н. А., Цуев М. М., Саратов Э. Х. Большие данные и некоторые возможности их применения // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19, № 3 (33). С. 15–23.

References

1. Kubasov I.A., Ivanov A.I. Entropy-neural network method for eliminating inconsistencies in expert assessments. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):56–63. (In Russ.)
2. Sychugov A.A., Grekov M.M. Application of Generative Adversarial Networks in Anomaly Detection Systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2021;9(1):1–9. (In Russ.)
3. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N. Multiplicative-neural network combination of the Hurst and Murota-Takeuchi statistical tests for testing the normality hypothesis of small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):27–33. (In Russ.)

4. Tsar'kova E.G. A mathematical model of an artificial neural network for controlling a robotic complex in extreme conditions. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2022;(11). (In Russ.). Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8026
5. Belov A.M., Belov M.P. Application of neural networks in electric drive systems of pumping units. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam = International conference on soft computing and measurement*. 2022;1:91–94. (In Russ.)
6. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Synthesis of a neural network controller for controlling a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2020;(2–3):25–36. (In Russ.). doi: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36
7. Filyushov V.Yu. *Polynomial method for synthesizing controllers for multichannel objects with a non-square matrix transfer function*. PhD dissertation: 2.3.1. Saint Petersburg, 2022:177. (In Russ.)
8. Voevoda A.A., Shipagin V.I. On the controllability and observability of multichannel automatic control systems in synthesis by a modal method using a polynomial matrix decomposition of the object and the controller. *Bezopasnost' tsifrovyykh tekhnologiy = Digital security*. 2022;(3):26–48. (In Russ.). doi: 10.17212/2782-2230-2022-3-26-48
9. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Calculation of a controller for a multi-channel object with non-stationary parameters containing delay links. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Data analysis and processing systems*. 2022;1(85):7–24. (In Russ.). doi: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24
10. Khastsaev B.D., Khmara V.V., Alikov A.Yu., Marsov V.I., Suvorov D.N. Advanced remote temperature sensor for automated process control systems. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskije nauki = Bulletin of State Humanitarian and Technological University. Engineering sciences*. 2022;18(2):33–40. (In Russ.)
11. Lysenko D.S. Intelligent system for adaptation of standard automatic control laws with the function of identifying the structure and parameters of an object. *Vestnik Samar'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije nauki = Bulletin of Samara State Technical University. Series: Engineering sciences*. 2022;30(1):46–62. (In Russ.). doi: 10.14498/tech.2022.1.3
12. Moiseenko N.A., Tsuev M.M., Saratova E.Kh. Big data and some possibilities of its application. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskije nauki = Bulletin of State Humanitarian and Technological University. Engineering sciences*. 2023;19(3):15–23. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Александрович Корнюшкин

аспирант, Санкт-Петербургский
государственный университет
телекоммуникаций имени профессора
М. А. Бонч-Бруевича (Россия,
г. Санкт-Петербург, пр-кт Большевиков,
22, корп. 1, литера А, Ж)

E-mail: kornyushkin_98@mail.ru

Dmitriy A. Kornushkin

Postgraduate student, Saint-Petersburg
State University of Telecommunications
named after professor M.A. Bonch-
Bruevich (litera A, Zh, building 1,
22 Bolshevnikov avenue, Saint-Petersburg,
Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 25.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.08.2025

Принята к публикации / Accepted 29.09.2025