

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-113-124

EDN: AMZDLY

**Разработка автоматизированной системы управления
процессом сортировки**

**С. С. Закожурников¹, Г. С. Закожурникова^{✉2}, К. В. Приходьков²,
Т. А. Горшунова¹, О. А. Пихтилькова¹, Е. В. Пронина¹, С. С. Лавренов³**

¹МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78

²Волгоградский государственный технический университет
400005, Россия, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28

³Университет «Синергия»
129090, Россия, Москва, ул. Мещанская, 9/14, стр. 1

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка автоматизированной системы управления процессом сортировки продуктов с использованием робота-манипулятора Dobot Magician. Повышение скорости и эффективности процессов сортировки, а также снижение затрат на ручной труд в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства является актуальной задачей.

Целью исследования является совершенствование системы сортировки путем разработки и реализации автоматизированной системы управления данным процессом.

Материалы и методы. Основными параметрами сортировки выбраны положение, цвет и температура объекта. В качестве исполнительного механизма системы управления выбран робот-манипулятор, управляемый через программное обеспечение DobotStudio и Arduino IDE. Система датчиков состоит из диффузионного фотоэлектрического датчика, датчика цвета и датчика температуры.

Результаты. Представлен циклический алгоритм работы, включающий инициализацию датчиков, захват объектов и их сортировку по заданным параметрам. Разработана 3D-версия системы, с помощью которой была проверена работоспособность алгоритма. Проведено пять серий экспериментов для двух вариантов сортировки: с использованием ручной сортировки и с использованием разработанной системы управления.

Выводы. В результате реализации разработанной системы управления удалось повысить производительность на 20 %, а также улучшить качество сортировки. Внедрение разработанной системы позволит уменьшить количество бракованной продукции и приведет к повышению экономической эффективности производства.

Ключевые слова: система управления, система сортировки, Dobot Magician, робот-манипулятор, микроконтроллер, фотоэлектрический датчик, датчик цвета, датчик температуры

Поступила 30.06.2025, одобрена после рецензирования 15.08.2025, принята к публикации 25.09.2025

Для цитирования. Закожурников С. С., Закожурникова Г. С., Приходьков К. В., Горшунова Т. А., Пихтилькова О. А., Пронина Е. В., Лавренов С. С. Разработка автоматизированной системы управления процессом сортировки // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 113–124. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-113-124

Automated sorting control system development

S.S. Zakozhurnikov¹, G.S. Zakozhurnikova^{✉2}, K.V. Prikhodkov²,
T.A. Gorshunova¹, O.A. Pikhtilkova¹, E.V. Pronina¹, S.S. Lavrenov³

¹MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky avenue, Moscow, 119454, Russia

²Volgograd State Technical University
28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia

³Synergy University
9/14, building 1, Meshchanskaya street, Moscow, 129090, Russia

Abstract. This article discusses the development of a Dobot-based automated sorting system for products. Improving the speed and efficiency of sorting processes, as well as reducing manual labor costs in various industries and agriculture, is an urgent task.

Aim. The study aims to advance the sorting process by developing and implementing an automated system to control it.

Materials and methods. The main sorting criteria are the position, color, and temperature of the object. A robotic manipulator controlled by DobotStudio and Arduino IDE software are selected as the actuator of the control system. The sensor system consists of a diffusion photoelectric sensor, a color sensor and a temperature sensor.

Results. A cyclic sort algorithm is presented, including the sensor-based sorting, a robotic arm that sorts objects based on their specified parameters. A three-dimensional (3D) model of the system has been developed, which helps to test the operability of the algorithm. Five series of experiments were conducted using two sorting methods: manual sorting and the developed control system.

Conclusions. As a result of implementing the developed management system, we are able to increase productivity by 20% and improve the quality of sorting. The implementation of the developed system reduces the number of defective products and lead to an increase in the productive efficiency.

Keywords: control system, sorting system, Dobot Magician, robotic arm, microcontroller, photoelectric sensor, RGB sensor, temperature sensor

Submitted on 30.06.2025,

approved after reviewing on 15.08.2025,

accepted for publication on 25.09.2025

For citation. Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Prikhodkov K.V., Gorshunova T.A., Pikhtilkova O.A., Pronina E.V., Lavrenov S.S. Automated sorting control system development. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 113–124. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-113-124

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование существующих промышленных систем сортировки является актуальной задачей [1–3]. Такие системы широко применяются при производстве автомобилей, сборке техники, сортировке сельскохозяйственной продукции, продуктов питания и лекарственных препаратов [4–7]. Данные системы используются для автоматизации процессов сборки, упаковки, хранения и доставки товаров. Совершенствование систем сортировки способствует развитию сопутствующих технологий, применяемых в этих системах [8–11]. Улучшение систем сортировки приводит к повышению производительности, качества производства, энергоэффективности, сокращению финансовых затрат на работу персонала [12–15].

Автоматизированные системы сортировки значительно эффективнее других способов сортировки. Такие системы работают гораздо быстрее, чем ручные методы, способны обрабатывать большие объемы в сжатые сроки, тем самым повышая пропускную способность системы производства или логистики. Точность сортировки повышается благодаря использованию инновационных технологий, таких как оптическое распознавание, машинное обучение или компьютерное зрение. Также установка современных датчиков цвета приводит к уменьшению количества ошибок при сортировке. Полное или частичное исключение человека из процесса сортировки снижает риск ошибок, что приводит к повышению качества сортировки и уменьшению потерь.

Автоматизированные системы сортировки легко масштабируются в зависимости от технических или технологических условий. В систему управления процессом сортировки можно интегрировать программное обеспечение для отслеживания и мониторинга объектов в режиме реального времени.

Целью исследования является совершенствование системы сортировки путем разработки и реализации автоматизированной системы управления данным процессом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим систему сортировки продуктов. Имеется три основных параметра сортировки: положение объекта, его цвет и температура. Существующая ручная система сортировки имеет ряд недостатков, таких как высокий процент брака, низкая скорость обработки продуктов, большие финансовые издержки. Предлагается создать автоматизированную систему сортировки продуктов. В качестве исполнительного механизма системы сортировки использован робот-манипулятор Dobot Magician.

Dobot Magician обладает такими преимуществами, как простота использования и интуитивно понятный графический интерфейс программирования Dobot Blockly. Кроме того, Dobot Magician поддерживает дополнительные технические модули, включая конвейер и систему датчиков. Поэтому именно данный робот-манипулятор был выбран для создания системы управления.

Необходимо разработать алгоритм сортировки, написать программу для управляющего устройства, проверить работоспособность системы в программе и на физической модели.

Алгоритм работы автоматизированной системы

Автоматизированная система [16–18] функционирует следующим образом: объекты различных цветов и температур перемещаются по конвейеру. Когда объект проходит перед диффузионным фотоэлектрическим датчиком, тот срабатывает. С помощью программного обеспечения «DobotStudio» устройства системы взаимодействуют между собой, в результате чего конвейер останавливается. Робот-манипулятор, оборудованный специализированной насадкой, захватывает объект и подносит его к датчикам цвета и температуры. В зависимости от полученных данных робот перемещает объект в определенное место, после чего система продолжает свою работу.

Составлена структурная схема автоматизированной системы управления, на которой обозначены пути передачи данных между элементами (рис. 1).

Система включает в себя несколько ключевых элементов, каждый из которых выполняет определенные функции. Главным компонентом системы является персональный компьютер (ПК), который используется для программирования в Arduino IDE и DobotStudio, а также для запуска программ. Arduino Mega 2560 отвечает за прием данных от датчика, сравнение их с заданным пороговым значением, управление связью инфракрасного дат-

чика температуры с роботом-манипулятором. Dobot Magician выполняет ключевые функции в процессе сортировки, включая реализацию самой сортировки, отправку сигналов для изменения скорости конвейерной ленты и прием данных с датчиков. Датчик положения информирует робота-манипулятора о наличии объекта перед ним на конвейерной ленте. Датчик цвета считывает данные о цвете объекта и передает их роботу-манипулятору. Инфракрасный датчик температуры измеряет температуру объекта и передает полученные данные микроконтроллеру. Кроме того, конвейерная лента отвечает за перемещение объектов, подлежащих сортировке.

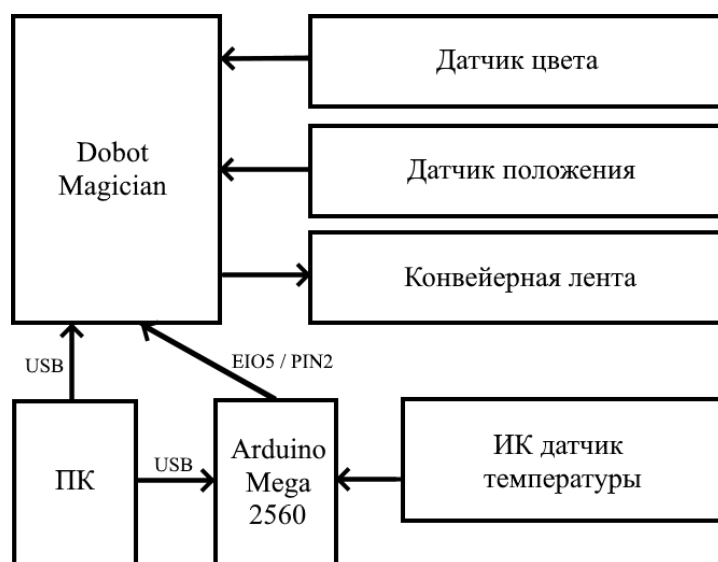


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы управления

Fig. 1. Block diagram for an automated control system

3D-модель системы с конвейером и роботом-манипулятором представлена на рис. 2. Создание данной модели нужно для проверки работоспособности составленных программ сортировки.



Рис. 2. 3D-модель системы сортировки с роботом-манипулятором

Fig. 2. 3D model of a sorting system with a robotic arm

3D-модель включает в себя роботизированную руку с насадкой в форме клешни, конвейерную ленту (длина ленты может быть изменена), генератор объектов, который может создавать объекты, обладающие различными свойствами, три датчика: датчик положения, датчик цвета и датчик температуры. С помощью данной модели можно исследовать различные варианты сортировки, оценить влияние параметров генерируемых объектов на эффективность процесса сортировки.

Для взаимодействия с ИК-датчиком температуры применяется плата Arduino Mega 2560, которая подключается к среде Arduino IDE и использует библиотеки «Wire» и «Adafruit_MLX90614». Питание датчика подается на вход 5V, заземление – на вход GND (рис. 3). Контакт 2 микроконтроллера [19-21] подключается к входу EIO5, с которого снимаем значения температуры. Если значение, полученное с датчика температуры, будет больше 27 градусов Цельсия, то на контакте 2 получим значение 1. Если значение температуры, полученное с датчика, будет меньше или равно 27 градусам, то на контакте 2 получим значение 0. Для подключения Arduino к Dobot Magician был выбран один из разъемов на башне робота.

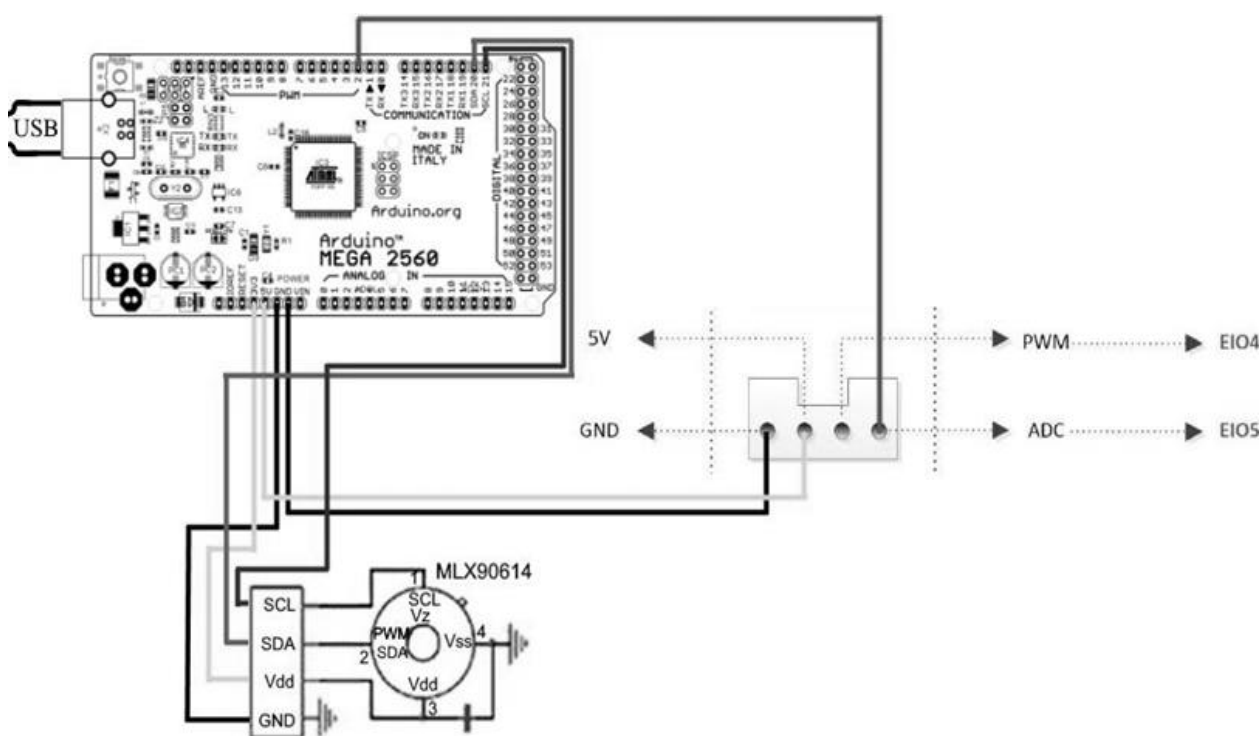


Рис. 3. Схема подключения ИК-датчика

Fig. 3. Connection diagram for the IR sensor

Далее была разработана программа в среде DobotStudio. С ее помощью обрабатываются данные о температуре объекта сортировки и осуществляется перемещение роботом объектов. Сначала идет инициализация датчиков: фотоэлектрического датчика и датчика цвета. Далее инициализируется вход на башне робота для получения данных с инфракрасного датчика температуры [22]. После этого запускается бесконечный цикл «while(true)». В начале цикла активируется конвейер. Он движется до тех пор, пока объект на конвейере не дойдет до фотоэлектрического датчика. Далее параметр, получаемый с данного датчика, меняет свое значение с 0 на 1, и конвейер останавливается. После этого башня робота перемещается к объекту перед датчиком. Далее происходит захват объекта [23]. Объект

перемещается роботом к датчикам цвета и температуры. С него считываются соответствующие значения параметров задачи. Значения сохраняются в переменные «RedFlag», «BlueFlag», «GreenFlag» и «TEMP>27». Затем, в зависимости от полученных данных, робот перемещает объект в одно из шести мест. Например, если объект зеленого цвета и его температура выше 27 градусов, то он будет перемещен в первое место, если объект зеленого цвета и его температура ниже 27 градусов, то он будет перемещен во второе место. Аналогично для объектов синего и красного цветов. После захвата объекта роботом конвейер запускается, и цикл повторяется.

Алгоритм работы реализован на макете для проверки работоспособности и устранения ошибок. Физическая модель системы состоит из робота-манипулятора Dobot Magician, конвейерной ленты, системы датчиков, платы Arduino Mega 2560 и кубов, имеющих разный цвет и имитирующих объекты сортировки (рис. 4).

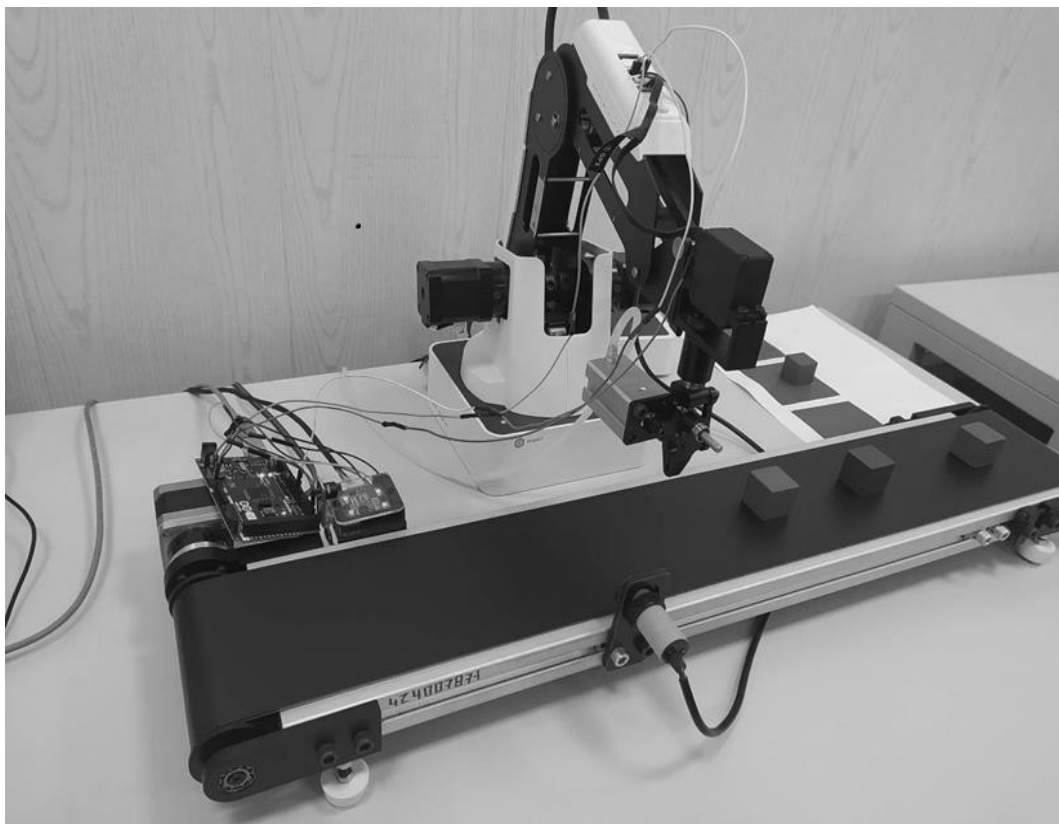


Рис. 4. Система сортировки с роботом-манипулятором

Fig. 4. Sorting robot manipulator

В результате данных проверок были скорректированы значения координат положения предметов относительно манипулятора, изменены скорость движения конвейера, тип передвижения Dobot Magician.

Реализовано два варианта системы сортировки. В первом варианте производится автоматизированная сортировка по двум параметрам: положению объекта в пространстве и цвету, далее происходит ручная сортировка в зависимости от температуры. Во втором варианте проводится автоматизированная сортировка по трем параметрам: положению объекта в пространстве, его цвету и температуре (разработанная система управления). Проведено 5 серий экспериментов. На конвейерную ленту загружалось одинаковое количество

объектов и производилось два варианта сортировки (параметры объектов и в первом, и во втором случае оставались одинаковыми). Для каждого варианта измерялось общее время процесса сортировки (рис. 5).

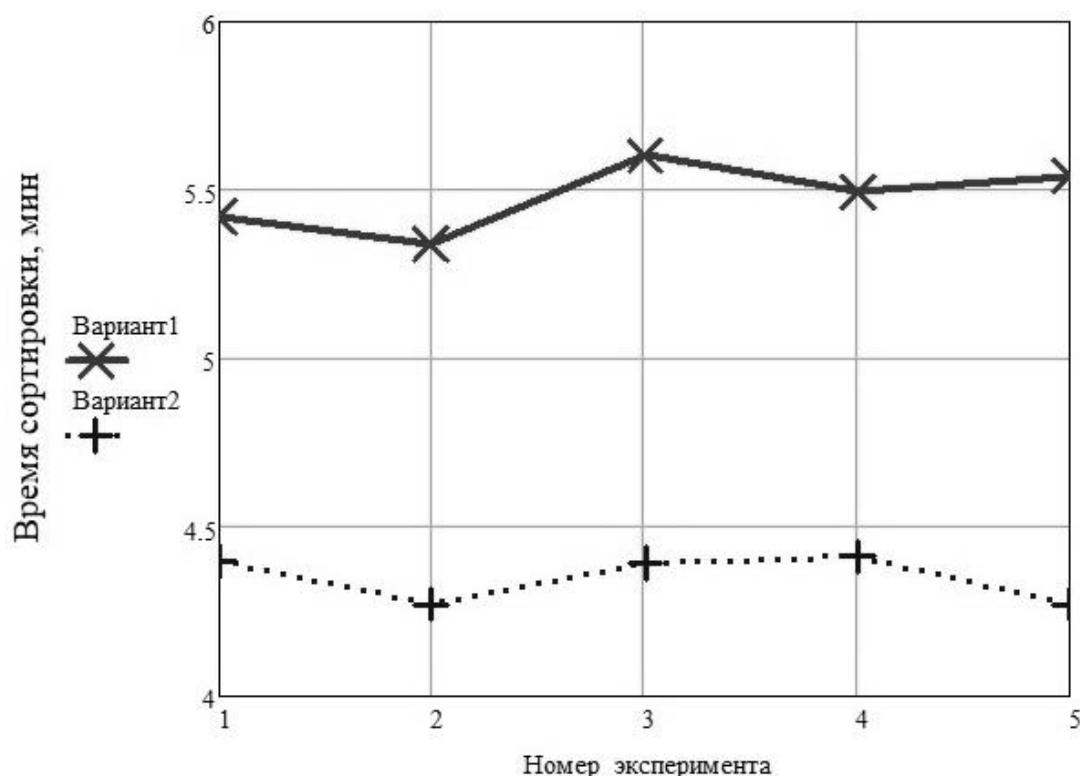


Рис. 5. Зависимость времени сортировки от варианта сортировки

Fig. 5. Relationship between sorting time and sorting method

Установлено, что время сортировки во втором варианте оказалось меньше времени сортировки в первом варианте в среднем на 20 %.

ВЫВОДЫ

Эффективность разработанной автоматизированной системы сортировки продуктов значительно превышает показатели ручных методов, что подтверждается повышением скорости обработки на 20 %.

Разработанный алгоритм управления показал свою работоспособность при тестировании на 3D-модели и в натурных экспериментах. В результате качество сортировки повышается и снижается риск ошибок.

Практическая значимость работы заключается в возможности масштабирования системы и ее адаптации под различные технические и технологические требования предприятий.

Перспективы дальнейших исследований связаны с усовершенствованием алгоритмов обработки данных, расширением функциональности системы и интеграцией с системами мониторинга и аналитики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троценко В. В., Федоров В. К., Забудский А. И., Комендантов В. В. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2022. 136 с. ISBN: 978-5-534-09938-6

2. Романов А. М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 1. Промышленная робототехника // Russian Technological Journal. 2019. № 7(5). С. 30–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46
3. Меркулов А. В., Харитонов К. Ю., Закожурников С. С. и др. Некоторые вопросы создания электронно-управляющих систем вращающихся объектов // Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сб. докл. Российской научно-технической конференции с международным участием. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. С. 212–215.
4. Zakozhurnikov S., Zakozhurnikova G. Development of a control system for sorting agricultural products according to specified criteria // E3S Web of Conf. 2023. № 390. Pp. 03019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339003019>
5. Лавренов С. С. Разработка автоматизированной системы сортировки // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: РАДУГА, 2023. С. 152.
6. Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1257. DOI: 10.3390/AGRONOMY11061257
7. Morozov S., Kuzmin K., Vershinin V. Development of a Simulation Automated System for Address Sorting of Correspondence // Conference «INTERAGROMASH 2021». 2022. Pp. 927–933. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_85
8. Abed Azad F., Ansari Rad S., Hairi Yazdi M.R. et al. Dynamics analysis, offline-online tuning and identification of base inertia parameters for the 3-DOF Delta parallel robot under insufficient excitations // Meccanica. 2022. Vol. 57(2). Pp. 473–506. DOI: 10.1007/s11012-021-01464-7
9. Tang Y., Li L., Liu X. State-of-the-art development of complex systems and their simulation methods // Complex System Modeling and Simulation. 2021. Vol. 1. No. 4. Pp. 271–290.
10. Mammadova K.A., Aliyeva E.N. Solving the problem of building an automatic control system for the process of water chemical treatment using fuzzy logic // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 362. Pp. 748–756. DOI: 10.1007/978-3-030-92127-9_99
11. Zhang L. Electric automation control simulation system based on intelligent technology // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2022. Vol. 125. Pp. 732–738.
12. Рафф О. И. Уменьшение энергопотребления путем внедрения системы «умный дом» // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVIII междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. М.: РАДУГА, 2022. С. 98.
13. Zakozhurnikov S., Gorshunova T., Pronina E., Raff O. Development of an automated lighting control system in agricultural premises to save energy resources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1231. No. 012061. P. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/1231/1/012061
14. Закожурникова Г. С., Закожурников С. С. К вопросу об энергоэффективности технологического процесса производства карбида кремния // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2017. № 3(20). С. 55–57.
15. Закожурников С. С. Повышение энергетической эффективности процесса плавки карбида кремния // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3-х томах, Москва, 25–26 февраля 2016 г. Т. 2. М.: МЭИ, 2016. С. 284.
16. Закожурников С. С., Закожурникова Г. С., Горишуннова Т. А. и др. Совершенствование математической модели получения мелкодисперсного материала для создания автоматизированной

системы управления процессом производства // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. No. 2. С. 11–25. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-2-11-25

17. *Zakozhurnikov S. S., Raфф O. И.* Разработка системы управления переключением света при помощи мессенджера Telegram // Оптические технологии, материалы и системы (Оппотех – 2024): Международная научно-техническая конференция, Москва, 02–08 декабря 2024 года. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 781–788.

18. *Zakozhurnikov S., Pikhtilkova O., Pronina E., Raff O.* The smart home automated control system development // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3102 (1): 030024. P. 1–4. DOI: 10.1063/5.0200045

19. *Renjini G. S., Thangavelusamy D.* Robust reference tracking and load rejection on non-linear system using controllers // Gazi University Journal of Science. 2022. Vol. 35. No. 4. Pp. 1454–1569. DOI: 10.35378/gujs.947882

20. *Li J., Liu C., Sun Y., Shao L.* A new event-triggered adaptive tracking controller for nonlinear systems with unknown virtual control coefficients // European Journal of Control. 2022. Vol. 100759. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ejcon.2022.100759

21. *Tamizi M. G., Ahmadi Kashani A. A., Abed Azad F. et al.* Experimental study on a novel simultaneous control and identification of a 3-DOF delta robot using model reference adaptive control // European Journal of Control. 2022. Vol. 67. No. 100715. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ejcon.2022.100715

22. *Лавренов С. С.* Применение фотоэлектрических датчиков на производстве // Оптические технологии, материалы и системы: сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 206–209.

23. *Воронков А. Д., Диане С. А.* Непрерывный генетический алгоритм в задаче захвата манипуляционным роботом объекта априорно неизвестной формы // Russian Technological Journal. 2023. № 11(1). С. 18–30. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-1-18-30

REFERENCES

1. *Trotsenko V.V., Fedorov V.K., Zabudskii A.I., Komendantov V.V.* *Sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami i informatsionnye tekhnologii* [Process control systems and information technology]: ucheb. posobie dlya vuzov. 2-e izd., ispr. i dop. Moscow: Yurait, 2022. 136 p. ISBN 978-5-534-09938-6. (In Russian)

2. *Romanov A.M.* An overview of the hardware and software of robot control systems of various scales and purposes. Part 1. Industrial Robotics. *Russian Technological Journal*. 2019. No. 7(5). Pp. 30–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46. (In Russian)

3. *Merkulov A.V., Kharitonova K.Yu., Zakozhurnikov S.S. et al.* *Nekotorye voprosy sozdaniya elektronno-upravlyayushchikh sistem vrashchayushchikhsya ob'ektov* [Some issues of creating electronic control systems for rotating objects]. *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sb. dokl. Rossiiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Innovative technologies in electronics and instrumentation: Collection of documents. The Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Moscow: MIREA – Rossiiskii tekhnologicheskii universitet, 2021. Pp. 212–215. (In Russian)

4. *Zakozhurnikov S., Zakozhurnikova G.* Development of a control system for sorting agricultural products according to specified criteria. *E3S Web of Conf.* 2023. No. 390. Pp. 03019. DOI: 10.1051/e3sconf/202339003019.

5. *Lavrenov S.S.* *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy sortirovki* [Development of an automated sorting system]. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tez. dokl. XXIX*

Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov [Radio electronics, electrical engineering and power engineering: Theses of reports. The Twenty-ninth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates]. Moscow: RADUGA, 2023. P. 152. (In Russian)

6. Dorokhov A., Aksenov A., Sibirev A. Results of laboratory studies of the automated sorting system for root and onion crops. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 1257. DOI: 10.3390/AGRONOMY11061257

7. Morozov S., Kuzmin K., Vershinin V. Development of a simulation automated system for address sorting of correspondence. *Conference «INTERAGROMASH 2021»*, 2022. Pp. 927–933. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1_85

8. Abed Azad F., Ansari Rad S., Hairi Yazdi M.R. et al. Dynamics analysis, offline–online tuning and identification of base inertia parameters for the 3-DOF Delta parallel robot under insufficient excitations. *Meccanica*. 2022. Vol. 57(2). Pp. 473–506. DOI: 10.1007/s11012-021-01464-7

9. Tang Y., Li L., Liu X. State-of-the-art development of complex systems and their simulation methods. *Complex System Modeling and Simulation*. 2021. Vol. 1. No. 4. Pp. 271–290.

10. Mammadova K.A., Aliyeva E.N. Solving the problem of building an automatic control system for the process of water chemical treatment using fuzzy logic. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 362. Pp. 748–756. DOI: 10.1007/978-3-030-92127-9_99

11. Zhang L. Electric automation control simulation system based on intelligent technology. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Vol. 125. Pp. 732–738.

12. Raff O.I. *Umen'shenie energopotrebleniya putem vnedreniya sistemy «umnyi dom»* [Reducing energy consumption by implementing a smart home system]. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tez. dokl. XXVIII mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. studentov i aspirantov* [Radio electronics, electrical engineering and energy: theses of reports. XXVIII International Scientific and Technical Conf. of students and postgraduates.]. Moscow: RADUGA, 2022. P. 98. (In Russian)

13. Zakozhurnikov S., Gorshunova T., Pronina E., Raff O. Development of an automated lighting control system in agricultural premises to save energy resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1231. No. 012061. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/1231/1/012061

14. Zakozhurnikova G.S., Zakozhurnikov S.S. On the issue of energy efficiency of the technological process of silicon carbide production. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. [Energy and Resource Conservation: Industry and Transport]. 2017. No. 3(20). Pp. 55–57. (In Russian)

15. Zakozhurnikov S.S. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti processa plavki karbida kremniya* [Increasing the energy efficiency of the silicon carbide smelting process] *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy dokladov XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov: v 3-h tomah*, Moscow, 25–26 fevralya 2016 goda. Vol. 2. Moscow: MJeI, 2016. p. 284. (In Russian)

16. Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Gorshunova T.A. et al. Improving the mathematical model for obtaining finely dispersed material for creating an automated production process control system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 2. Pp. 11–25. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-2-11-25. (In Russian)

17. Zakozhurnikov S.S., Raff O.I. Development of a light switching control system using the Telegram messenger. *Optical technologies, materials and systems (Optotech – 2024)*:

International scientific and technical conference, Moscow, December 02-08, 2024. Moscow: MIREA – Rossiyskiy tekhnologicheskii universitet, 2024. Pp. 781–788. (In Russian)

18. Zakozhnikov S., Pikhtilkova O., Pronina E., Raff O. The smart home automated control system development. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3102 (1): 030024. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0200045>

19. Renjini G.S., Thangavelusamy D. Robust reference tracking and load rejection on non-linear system using controllers. *Gazi University Journal of Science*. 2022. Vol. 35. No. 4. Pp. 1454–1569. DOI: 10.35378/gujs.947882

20. Li J., Liu C., Sun Y., Shao L. A new event-triggered adaptive tracking controller for nonlinear systems with unknown virtual control coefficients. *European Journal of Control*. 2022. Vol. 100759. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ejcon.2022.100759

21. Tamizi M.G., Ahmadi Kashani A.A., Abed Azad F. et al. Experimental study on a novel simultaneous control and identification of a 3-DOF delta robot using model reference adaptive control. *European Journal of Control*. 2022. Vol. 6. No. 100715. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ejcon.2022.100715

22. Lavrenov S.S. *Primenenie fotoelektricheskikh datchikov na proizvodstve* [Application of photovoltaic sensors in production]. *Opticheskie tekhnologii, materialy i sistemy: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Optical technologies, materials and systems: Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference]. IPTIP RTU MIREA. Moscow: MIREA – Rossiyskiy tekhnologicheskii universitet, 2022. Pp. 206–209. (In Russian)

23. Voronkov A.D., Diane S.A. A continuous genetic algorithm in the task of capturing an object of a priori unknown shape by a manipulative robot. *Russian Technological Journal*. 2023. No. 11(1). Pp. 18–30. DOI: 10.32362/2500-316X-2023-11-1-18-30. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Закожурников Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, ИПТИП, кафедра высшей математики – 3, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

zakozhnikov@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2354-9656>, SPIN-код: 1864-0437

Закожурникова Галина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Теплотехники и гидравлики», Волгоградский государственный технический университет;

400005, Россия, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28;

galya.vlz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4870-0749>, SPIN-код: 7209-9481

Приходьков Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Теплотехники и гидравлики», Волгоградский государственный технический университет;

400005, Россия, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28;

mlab@vstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9283-849X>, SPIN-код: 6006-0250

Горшунова Татьяна Алексеевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, ИПТИП, кафедра высшей математики – 3, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

gorshunova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-595X>, SPIN-код: 6120-6367

Пихтилькова Ольга Александровна, канд. физ.-мат. наук, доцент, ИПТИП, кафедра высшей математики – 3, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

pihtilkova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4632-5158>, SPIN-код: 5589-7411

Пронина Елена Владиславовна, канд. физ.-мат. наук, доцент, ИПТИП, кафедра высшей математики – 3, МИРЭА – Российский технологический университет;

119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78;

pronina@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2447-7175>, SPIN-код: 3391-3440

Лавренов Сергей Сергеевич, аспирант, кафедра робототехники, Университет «Синергия»;

129090, Россия, Москва, ул. Мещанская, 9/14, стр. 1;

lavrenovreal@gmail.com, SPIN-код: 5676-0040

Information about the authors

Sergey S. Zakozhurnikov, Candidate of Technical Sciences, Higher Mathematics-3 Department, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University;

78 Vernadsky avenue, Moscow, 119454, Russia;

zakozhurnikov@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2354-9656>, SPIN-code: 1864-0437

Galina S. Zakozhurnikova, Candidate of Technical Sciences, Heat Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Volgograd State Technical University;

28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia;

galya.vlz@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4870-0749>, SPIN-code: 7209-9481

Konstantin V. Prikhodkov, Candidate of Technical Sciences, Heat Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Volgograd State Technical University;

28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia;

mlab@vstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9283-849X>, SPIN-code: 6006-0250

Tatiana A. Gorshunova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Higher Mathematics-3 Department, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University;

78 Vernadsky avenue, Moscow, 119454, Russia;

gorshunova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-595X>, SPIN-code: 6120-6367

Olga A. Pikhtilkova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Higher Mathematics-3 Department, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University;

78 Vernadsky avenue, Moscow, 119454, Russia;

pihtilkova@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4632-5158>, SPIN-code: 5589-7411

Elena V. Pronina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Higher Mathematics-3 Department, Associate Professor, MIREA – Russian Technological University;

78 Vernadsky avenue, Moscow, 119454, Russia;

pronina@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2447-7175>, SPIN-code: 3391-3440

Sergey S. Lavrenov, Postgraduate Student, Department of Robotics, Synergy University;

9/14, building 1, Meshchanskaya street, Moscow, 129090, Russia;

lavrenovreal@gmail.com, SPIN-code: 5676-0040