

## **ГИБРИДНАЯ АРХИТЕКТУРА КООПЕРАТИВНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ФОРМАЛЬНЫМИ ГАРАНТИЯМИ БЕЗОПАСНОСТИ**

И.Р. Евчук<sup>1</sup>, А.И. Заревич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В работе мы разбираем задачу, как группе мобильных роботов безопасно и эффективно перемещаться вместе, когда обстановка постоянно меняется. Предложили гибридную архитектуру – расширили классическую модель взаимных скоростных препятствий, добавив в неё информацию о том, куда именно направляются соседние роботы. Метод работает в два уровня: глобальная прокладка маршрута делается на модифицированном алгоритме RRT\*, а локальное управление занимается оперативной координацией в реальном времени. Особое внимание уделили математическому обоснованию безопасности – строго доказали, что сдвиг зоны избегания в сторону цели соседа не ломает гарантии бесстолкновительного движения. Вычислительные эксперименты показали, что наша архитектура заметно реже приводит к взаимным блокировкам и повышает долю успешно выполненных миссий по сравнению с базовыми алгоритмами.

Ключевые слова: кооперативная навигация, многоагентные системы, мобильные роботы, избегание столкновений, RVO, гибридная архитектура, формальные гарантии безопасности, RRT\*.

## **HYBRID ARCHITECTURE OF COOPERATIVE NAVIGATION OF MOBILE ROBOTS WITH FORMAL GUARANTEES OF SAFETY**

I.R. Evchuk<sup>1</sup>, A.I. Zarevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. The paper examines the problem of safe and effective joint movement of groups of mobile robots in a dynamically changing environment. A hybrid architecture is proposed that expands the classical model of mutual growth obstacles by integrating information about the target positions of surrounding robots. The method is implemented as a two-level system: global trajectory planning

is performed based on a modified RRT\* algorithm, and local management provides real-time operational coordination. Special attention is paid to the rigorous mathematical justification of safety: it is formally proved that the vector displacement of the avoidance area in the direction of the neighbor's goal does not violate the guarantees of uninterrupted movement. The results of computational experiments show that the proposed architecture significantly reduces the frequency of interlocks and increases the proportion of successfully completed missions compared to the basic algorithms.

Keywords: cooperative navigation, multi-agent systems, mobile robots, collision avoidance, RVO, hybrid architecture, formal safety guarantees, RRT\*.

## **Введение**

Современные приложения автономной робототехники – от складской логистики до поисково-спасательных операций – всё чаще требуют, чтобы роботы работали в группе согласованно. В таких условиях главной становится задача кооперативной навигации: нужно, чтобы несколько агентов безопасно и эффективно двигались к своим индивидуальным целям, без централизованного управления.

Существующие подходы делятся на две категории. Централизованные методы, например Conflict-Based Search (CBS), умеют находить оптимальные решения, но их сложность растёт экспоненциально с числом роботов – для больших групп они становятся непрактичными. Децентрализованные реактивные методы, самые известные из которых – Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) и Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA), наоборот, хорошо масштабируются. Однако их ключевой недостаток – игнорирование стратегических намерений других агентов. Принимая решения только на основе их текущих позиций и скоростей, роботы часто попадают в ситуации взаимных блокировок, например, при встречном движении в узком коридоре.

Гибридные архитектуры, объединяющие глобальное планирование траектории и локальное избегание столкновений, представляются естественным путем решения этой проблемы. Однако большинство из них используют фиксированные гиперпараметры, требующие ручной настройки, и не учитывают цели соседей при локальных маневрах.

Целью данной работы является представление гибридной архитектуры GARCA (Goal-Aware Reciprocal Collision Avoidance), которая преодолевает указанные ограничения. Основное внимание уделяется описанию архитектуры и формальному обоснованию ее безопасности – ключевому преимуществу перед методами «черного ящика» на основе обучения.

## Архитектура гибридного метода GARCA

Метод GARCA реализован как двухуровневая децентрализованная система управления навигацией группы мобильных роботов. Общая схема архитектуры представлена на рисунке 1. Первый уровень обеспечивает глобальное планирование траекторий, второй – локальную координацию движений. Ключевая особенность системы – наличие обратных связей, которые гарантируют согласование глобальных планов с фактическими перемещениями роботов.



Рисунок 1 – Структурная схема метода GARCA+ГА

На рисунке 2 синим цветом показана классическая зона взаимодействия для пары роботов. Если выбрать скорость из этой области, есть риск столкнуться. В нашем методе GARCA эта зона смещается (красная область) – на вектор, который направлен к цели второго робота. При этом критическая область, где столкновение почти неизбежно (серый круг), остаётся нетронутой. Такое смещение заставляет первого робота выбирать скорость, которая не только безопасна, но и помогает соседу двигаться к его цели. А значит, симметричные тупиковые ситуации разрешаются.

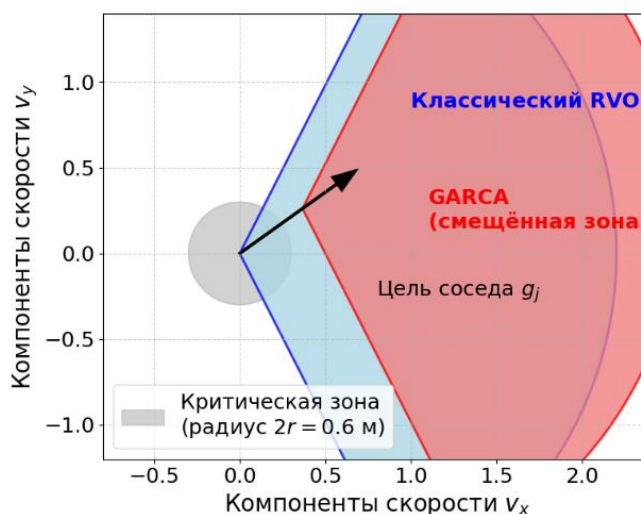


Рисунок 2 – Иллюстрация смещения зоны RVO

Сравнение того, как происходит обмен информацией между двумя роботами в классическом и предложенном подходах, показано на рисунке 3. В методе RVO (а) роботы обмениваются только своим текущим состоянием. А GARCA (б) добавляет к обмену ещё и цели – именно это и даёт кооперативный эффект.

Существенное преимущество разработанной архитектуры – возможность обеспечения формальных гарантий безопасности, то есть математического доказательства отсутствия столкновений при выполнении определённых условий. Указанные допущения (точная локализация, надёжный канал связи, ограниченная скорость движущихся препятствий и безопасное начальное расположение) вполне реализуемы на современных робототехнических платформах.

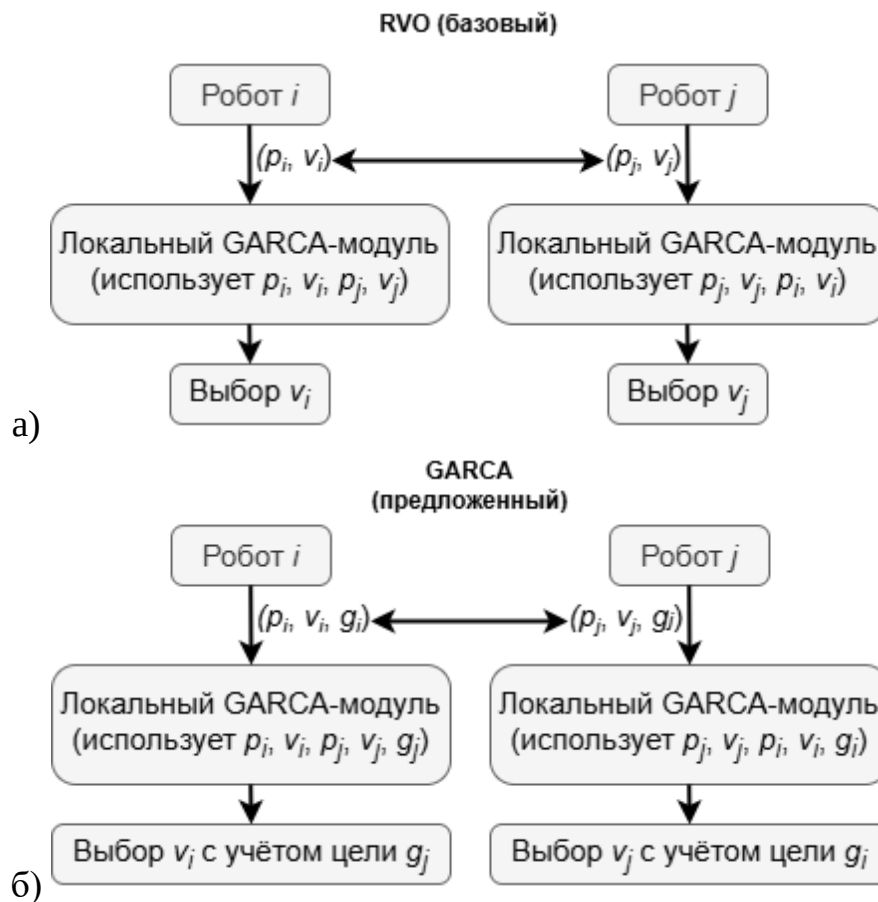


Рисунок 3 – Блок-схема взаимодействия двух роботов:

а) классический RVO; б) GARCA

Доказательство безопасности опирается на геометрические характеристики модифицированной зоны RVO. Как иллюстрирует рисунок 2, вектор смещения ориентирован на цель соседнего робота и не направлен внутрь критической зоны столкновения – круга радиусом, равным сумме радиусов роботов и защитного зазора. Следовательно, область безопасных скоростей, определяемая как пересечение дополнений всех смещённых зон RVO для каждого соседа, всегда остаётся непустой и включает нулевую скорость. Это обеспечивает наличие

у робота гарантированного безопасного манёвра, такого как полная остановка. При высокой частоте обновления управляющих воздействий (10 Гц) безопасность поддерживается непрерывно на протяжении всего движения.

### Результаты экспериментальных исследований

Эффективность предложенного подхода была подтверждена в ходе численных экспериментов. Сравнительное тестирование проводилось для группы из 20 роботов в двух типах сред: структурированной офисной (с коридорами и комнатами) и неструктурированной полигональной (с хаотично расположенными препятствиями). Архитектура тестировалась как с фиксированными, эвристически подобранными параметрами, так и в составе предложенного автором гибридного метода GARCA+ГА, где 6 ключевых параметров архитектуры автоматически настраивались с помощью генетического алгоритма под конкретный тип среды.

Результаты приведены в таблица. Они наглядно демонстрируют преимущества учета целей соседей. Базовая версия алгоритма с фиксированными параметрами превосходит классические методы RVO и ORCA по успешности выполнения миссий. Адаптивная версия, использующая генетический алгоритм, показывает наилучшие результаты в обеих средах. Это подтверждает важность настройки поведения под конкретные условия.

Таблица 1 – Сравнение методов (усреднено по 30 запускам)

| Метод            | Среда   | Успех, % | Время J_T, с | Длина J_L, м | Блокировки |
|------------------|---------|----------|--------------|--------------|------------|
| RVO              | Офис    | 88±4,2   | 42,1±3,1     | 14,2±1,3     | 8,4±1,2    |
|                  | Полигон | 64±6,1   | 68,3±5,7     | 21,7±2,0     | 10,3±1,8   |
| GARCA<br>(фикс.) | Офис    | 94±2,6   | 36,2±2,2     | 12,1±0,9     | 4,2±0,8    |
|                  | Полигон | 76±4,3   | 58,7±4,0     | 17,9±1,4     | 5,8±1,1    |
| GARCA+ГА         | Офис    | 97±1,9   | 32,4±1,8     | 11,3±0,7     | 1,5±0,4    |
|                  | Полигон | 89±3,0   | 48,2±3,2     | 15,1±1,2     | 2,3±0,6    |

Наиболее показательным является сценарий взаимной блокировки двух роботов в узком коридоре. Как показано на рисунке 4, классические методы приводят к хаотичным колебаниям и отсутствию прогресса, в то время как GARCA обеспечивает плавное и быстрое расхождение агентов.

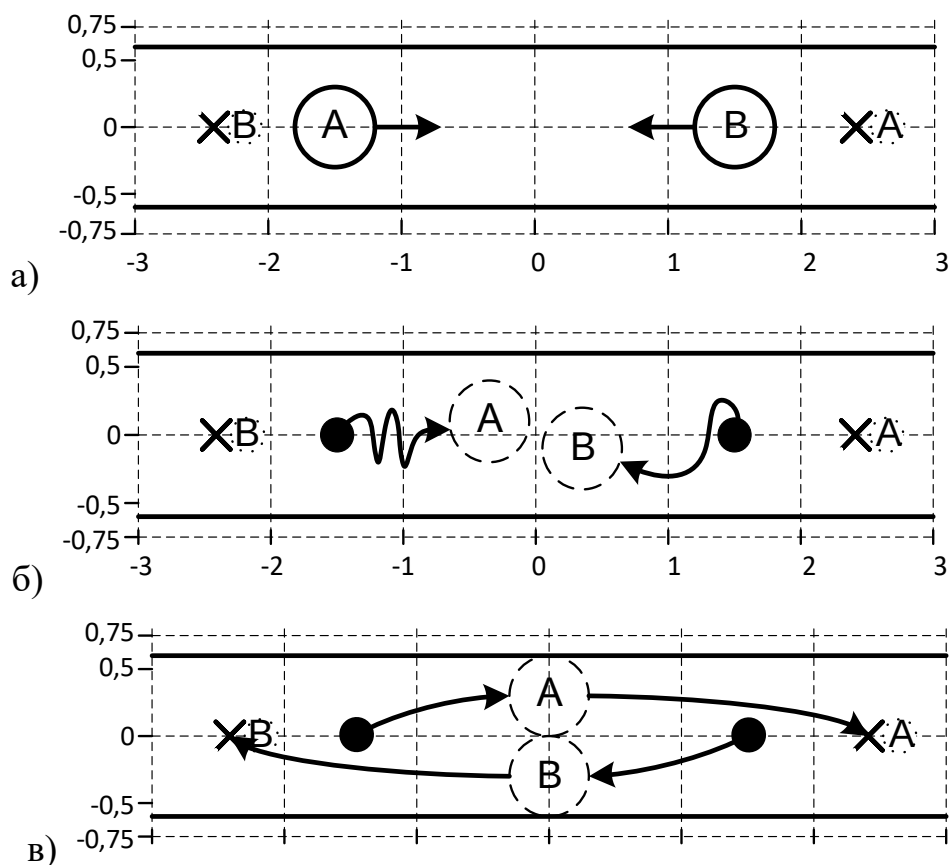


Рисунок 4 – Иллюстрация сценария взаимной блокировки:

б) RVO – хаотичные движения;

в) GARCA+ГА – плавное расхождение

## Заключение

В работе представлен гибридный метод кооперативной навигации для групп мобильных роботов. Главной особенностью метода является расширение классического механизма RVO за счет учета целевых позиций соседних агентов, что позволяет эффективно разрешать конфликтные ситуации и взаимные блокировки.

В работе приведено формальное доказательство безопасности предложенного подхода. Показано, что модификация зоны избегания путем ее смещения к цели соседа не нарушает условий бесконфликтности, сохраняя математические гарантии, присущие геометрическим методам. Это выгодно отличает наш метод от недетерминированных подходов на основе машинного обучения.

Результаты численного эксперимента подтвердили эффективность архитектуры, то есть показано, что предложенный: метод GARCA в связке с эволюционной настройкой параметров значительно превосходит базовые алгоритмы RVO и ORCA по успешности выполнения миссий и времени достижения целей,

особенно в сложных полигональных средах, при этом количество взаимных блокировок сокращается в разы. Таким образом усиливается баланс между адаптивностью, вычислительной эффективностью и строгими гарантиями безопасности в многоагентных робототехнических системах.

### Список литературы

1. Sharon G., Stern R., Felner A., Sturtevant N. R. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding // Artificial Intelligence. – 2015. – Vol. 219. – Pp. 40-66.
2. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2008. – Pp. 1928-1935.
3. Van den Berg J., Guy S. J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n-body collision avoidance // Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – Pp. 3-19.
4. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // The International Journal of Robotics Research. – 2011. – Vol. 30, № 7. – Pp. 846-894.
5. Заревич А. И., Макаренко Ф. В., Ягодкин А. С., Зольников К. В. Моделирование поведения мобильных роботов с использованием генетических алгоритмов // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 7-16.
6. Santos F. M., Silva M. G., Moreira A. P. Hybrid RRT\*-RVO for multi-robot navigation in dynamic environments // ROBOTICA. – 2019. – Vol. 37, № 9. – Pp. 1571-1587.
7. Преобразования элементов уровней проектирования с учетом радиационного воздействия / А. В. Полуэктов, А. И. Заревич, Ф. В. Макаренко [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2025. – № 3. – С. 19–28.
8. Исследование способов защиты информации от утечки по акустическому и виброакустическому каналам / В. К. Зольников, С. А. Сазонова, А. И. Заревич, С. С. Башун // Моделирование систем и процессов. – 2025. – Т. 18, № 2. – С. 27–40.
9. Исследование эффективности защиты от гамма-излучения с использованием многослойного полусферического экрана / А. В. Полуэктов, А. И. Заревич, Ф. В. Макаренко, М. В. Солодилов // Моделирование систем и процессов. – 2025. – Т. 18, № 4. – С. 71–83.

10. Разработка информационной подсистемы банка по выдаче кредитов / С. А. Сазонова, В. Ф. Асминин, А. И. Заревич // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2025. – № 2 (36). – С. 10–17.
11. Анализ количества потребления SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub> для заправки коммутационной аппаратуры высокого напряжения / Н. Ю. Заленская, Ф. В. Макаренко, А. И. Заревич, А. В. Полуэктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 3–16. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16. – EDN HOOMCR.
12. Аппроксимация спектра поглощения фосфида индия в контексте моделирования процесса осязания / Ф. В. Макаренко, В. К. Зольников, А. И. Заревич [и др.] // Микроэлектроника. – 2024. – Т. 53, № 4. – С. 318–330. – DOI 10.31857/S0544126924040041. – EDN ZACOA1.
13. Approximation of the absorption spectrum of indium phosphide in the context of simulation of the process of sensation / Ph. V. Makarenko, V. K. Zolnikov, A. I. Zarevich [et al.] // Russian Microelectronics. – 2024. – Vol. 53, № 4. – Pp. 329–338. – DOI 10.1134/S1063739724040041.
14. Development of technology and design platforms at topological norms less than 90 nm / E. Grosheva, A. Zarevich, A. Deniskina, K. Fatullaeva // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 03018. – DOI 10.1051/bioconf/202414503018.
15. Modeling of information-analytical support for the timber industry complex / A. Poluektov, T. Skvortsova, E. Anikeev, A. Yagodkin // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 04022. – DOI 10.1051/bioconf/202414504022. – EDN YJLKEE.
16. Structural mechanics in forestry based on digital twin / A. Zarevich, A. Poluektov, Yu. Sumina, Ph. Makarenko // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 145. – P. 05005. – DOI 10.1051/bioconf/202414505005. – EDN PZLCHN.
17. Повышение формализации задач верификации топологии и электрической схемы для систем автоматизированного проектирования / А. В. Полуэктов, К. В. Зольников, А. В. Ачкасов, Ю. А. Чевычелов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 102–111. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111. – EDN QIKKRO.
18. Моделирование влияния электромагнитных полей на микросхемы / А. В. Полуэктов, Р. Ю. Медведев, К. В. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 129–136. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-129-136. – EDN HWPUXU.

## References

1. Sharon G., Stern R., Felner A., Sturtevant N. R. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding // Artificial Intelligence. – 2015. – Vol. 219. – Pp. 40-66.
2. Van den Berg J., Lin M., Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation // 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2008. – Pp. 1928-1935.
3. Van den Berg J., Guy S. J., Lin M., Manocha D. Reciprocal n-body collision avoidance // Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – Pp. 3-19.
4. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // The International Journal of Robotics Research. – 2011. – Vol. 30, No. 7. – Pp. 846-894.
5. Zarevich A. I., Makarenko F. V., Yagodkin A. S., Zolnikov K. V. Modeling the behavior of mobile robots using genetic algorithms // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 3. – Pp. 7-16.
6. Santos F. M., Silva M. G., Moreira A. P. Hybrid RRT\*-RVO for multi-robot navigation in dynamic environments // ROBOTICA. – 2019. – Vol. 37, No. 9. – Pp. 1571-1587.
7. Transformations of elements of design levels taking into account radiation exposure / A.V. Poluektov, A. I. Zarevich, F. V. Makarenko [et al.] // Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on electronic equipment. 2025. No. 3. Pp. 19-28.
8. Investigation of ways to protect information from leakage through acoustic and vibroacoustic channels / V. K. Zolnikov, S. A. Sazonova, A. I. Zarevich, S. S. Bashun // Modeling of systems and processes. – 2025. – Vol. 18, No. 2. – Pp. 27-40.
9. Investigation of the effectiveness of protection against gamma radiation using a multilayer hemispherical screen / A.V. Poluektov, A. I. Zarevich, F. V. Makarenko, M. V. Solodilov // Modeling of systems and processes. 2025. Vol. 18, No. 4. Pp. 71-83.
10. Development of the bank's information subsystem for issuing loans / S. A. Sazonova, V. F. Asminin, A. I. Zarevich // Information technologies in construction, social and economic systems. – 2025. – № 2 (36). – Pp. 10-17.

11. Analysis of the amount of SF<sub>6</sub> and cf<sub>4</sub> consumption for refueling high-voltage switching equipment / N. Y. Zalenskaya, F. V. Makarenko, A. I. Zarevich, A.V. Poluektov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems.* – 2024. – Vol. 26, No. 4. – Pp. 3-16. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16. – EDN HOOMCR.
12. Approximation of the absorption spectrum of indium phosphide in the context of modeling the process of sensitization / F. V. Makarenko, V. K. Zolnikov, A. I. Zarevich [et al.] // *Microelectronics.* – 2024. – Vol. 53, No. 4. – Pp. 318-330. – DOI 10.31857/S0544126924040041. – EDN ZACOA1.
13. Approximation of the absorption spectrum of indium phosphide in the context of simulation of the process of sensation / Ph. V. Makarenko, V. K. Zolnikov, A. I. Zarevich [et al.] // *Russian Microelectronics.* – 2024. – Vol. 53, № 4. – Pp. 329–338. – DOI 10.1134/S1063739724040041.
14. Development of technology and design platforms at topological norms less than 90 nm / E. Grosheva, A. Zarevich, A. Deniskina, K. Fatullaeva // *BIO Web of Conferences.* – 2024. – Vol. 145. – P. 03018. – DOI 10.1051/bioconf/202414503018.
15. Modeling of information-analytical support for the timber industry complex / A. Poluektov, T. Skvortsova, E. Anikeev, A. Yagodkin // *BIO Web of Conferences.* – 2024. – Vol. 145. – P. 04022. – DOI 10.1051/bioconf/202414504022. – EDN YJLKEE.
16. Structural mechanics in forestry based on digital twin / A. Zarevich, A. Poluektov, Yu. Sumina, Ph. Makarenko // *BIO Web of Conferences.* – 2024. – Vol. 145. – P. 05005. – DOI 10.1051/bioconf/202414505005. – EDN PZLCHH.
17. Increasing the formalization of topology and electrical circuit verification tasks for computer-aided design systems / A.V. Poluektov, K. V. Zolnikov, A.V. Achkasov, Yu.A. Chevychelov // *Modeling systems and processes.* – 2024. – Vol. 17, No. 1. – Pp. 102-111. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-102-111. – EDN QIKKRO.
18. Modeling the influence of electromagnetic fields on microcircuits / A.V. Poluektov, R. Y. Medvedev, K. V. Zolnikov // *Modeling of systems and processes.* – 2024. – Vol. 17, No. 1. – Pp. 129-136. – DOI 10.12737/2219-0767-2024-17-1-129-136. – EDN HWPUXU.