

УДК 004.051

Современные подходы к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава с применением многоагентных и нейросетевых технологий

Барановский Анатолий Михайлович

— канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационно-управляющие системы, контроль, диагностирование и управление техническим состоянием, нейронные сети. E-mail: bamvka@mail.ru

Бобриков Даниил Алексеевич

— магистр, аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных. E-mail: daniil20001210@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Барановский А. М., Бобриков Д. А. Современные подходы к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава с применением многоагентных и нейросетевых технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13

Аннотация. Рассматриваются современные подходы к диагностированию и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава. **Введение:** в условиях растущих требований к надежности и безопасности транспортных систем традиционные методы диагностики становятся недостаточно эффективными. **Цель:** исследовать возможности применения многоагентных и нейросетевых технологий для повышения эффективности диагностики и восстановления ИУС подвижного состава. **Методы:** в работе анализируются многоагентные системы, обеспечивающие распределенную диагностику, где агенты взаимодействуют для быстрого обнаружения и локализации неисправностей. Также исследуются нейросетевые технологии, обеспечивающие высокую точность прогнозирования неисправностей за счет анализа больших объемов данных и самообучения. **Результаты:** основной результат заключается в выявлении потенциала интеграции многоагентных и нейросетевых технологий. Показано, что их совместное применение может значительно повысить надежность, адаптивность и автономность ИУС подвижного состава. **Обсуждение:** обсуждаются перспективы создания гибридных систем, сочетающих многоагентные и нейросетевые методы. Рассматриваются их преимущества и ограничения, а также потенциал для дальнейшего улучшения ИУС в транспортных системах.

Ключевые слова: многоагентные системы, нейросетевые технологии, транспорт, информационно-управляющие системы, автоматизация

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **2.3.6** — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

Введение

Современные информационно-управляющие системы подвижного состава требуют высокой надежности и точности диагностирования для предотвращения сбоев и отказов оборудования, обеспечения безопасности транспортных средств. Традиционные методы диагностики часто не справляются с задачами в условиях увеличивающейся сложности оборудования и роста объемов данных. Интеллектуальные подходы, включающие многоагентные системы и нейросетевые технологии, позволяют автоматизировать диагностику, быстро выявлять неисправности и прогнозировать потенциальные отказы. Цель данной статьи — проанализировать возможности этих технологий в диагностике и восстановлении работоспособности подвижного состава, изучить их преимущества и ограничения, а также перспективы дальнейшего развития.

Современные требования к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем

С ростом сложности информационно-управляющих систем (ИУС) подвижного состава повышаются требования к их надежности и безопасности. ИУС играют центральную роль в управлении критически важными процессами, такими как контроль и управление движением, мониторинг состояния оборудования и поддержка безопасности пассажиров и грузов. Поэтому процессы диагностирования и восстановления работоспособности ИУС требуют внедрения высокоэффективных технологий, которые способны соответствовать современным требованиям к оперативности, достоверности и надежности обнаружения отказов и локализации дефектов.

Основные проблемы и вызовы, связанные с эксплуатацией подвижного состава

Подвижной состав функционирует в условиях сложных и часто непредсказуемых эксплуатационных нагрузок, таких как вибрация, температурные колебания и другие внешние воздействия. Эти условия увеличивают вероятность износа и отка-

зов различных компонентов системы. Ключевые проблемы, которые создают дополнительные вызовы для ИУС, включают:

- неопределенность факторов, влияющих на отказ: различия в условиях эксплуатации усложняют прогнозирование поломок;
- высокая скорость износа компонентов: интенсивность работы подвижного состава приводит к быстрому износу узлов и деталей;
- сложность выявления неисправностей: отказ одного компонента может оказывать влияние на работу всей системы, что затрудняет точную локализацию неисправности.

Эти факторы создают необходимость в адаптивных и интеллектуальных подходах, которые могут учитывать сложные и динамичные условия эксплуатации [1].

Требования к точности, оперативности и надежности диагностирования неисправностей

Современные ИУС должны обеспечивать оперативное и точное обнаружение неисправностей, а также максимально быстрое восстановление их работоспособности. К ключевым требованиям, предъявляемым к системам диагностики и восстановления, можно отнести:

1. Достоверность диагностики: интеллектуальные системы должны минимизировать вероятность ложных срабатываний и пропущенных ошибок, что особенно важно для обеспечения безопасности.
2. Высокая оперативность обнаружения неисправностей: для предотвращения выхода из строя критически важных узлов необходимо быстрое реагирование на возникновение неисправностей, а также возможность прогнозирования поломок до их фактического появления.
3. Надежность и устойчивость функционирования: системы диагностики должны сохранять работоспособность даже при частичных отказах и иметь встроенные механизмы самовосстановления, минимизирующие время простоя.

4. Автономность и возможность самообучения: поскольку подвижной состав может эксплуатироваться в условиях удаленности от комплексов технического обслуживания, интеллектуальные системы диагностики должны обладать функциями самообучения и адаптации к изменяющимся условиям.

Потребность в автоматизированных и интеллектуальных подходах

Традиционные методы диагностики и обслуживания подвижного состава, как правило, требуют участия операторов и специалистов, что усложняет и замедляет процесс восстановления системы при сбоях и отказах оборудования ИУС. Использование интеллектуальных технологий, таких как многоагентные и нейросетевые системы, позволяет автоматизировать диагностирование и обеспечить его высокую адаптивность. Основные преимущества интеллектуальных подходов включают:

1. Многоагентные системы: каждый агент выполняет специализированные функции в рамках общей системы, что позволяет распределить нагрузку и повысить гибкость диагностики. Многоагентные системы эффективны в задачах диагностики, так как они позволяют проводить параллельный анализ данных, полученных с различных узлов подвижного состава.

2. Нейросетевые технологии: нейронные сети способны обрабатывать большие объемы данных, распознавать сложные закономерности и адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Применение нейронных сетей позволяет прогнозировать потенциальные неисправности и обнаруживать скрытые паттерны, которые трудно выявить с помощью традиционных методов.

На рис. 1 приведена схема работы многоагентной системы по поиску и дальнейшему направлению к устранению неисправностей на железнодорожном транспорте.

На ней изображены основные этапы функционирования системы:

- датчики измеряют температуру, вибрации, напряжение и другие параметры;



Рис. 1. Схема работы многоагентной нейронной системы по поиску и дальнейшему устранению неисправностей

- сбор и анализ данных, поиск аномалий и обнаружение дефектов оборудования с помощью технологий искусственного интеллекта (ИИ);
- определение приоритетности ремонта;
- назначение бригад, запрос (поиск) необходимых для ремонта запасных частей и принадлежностей;
- восстановление работоспособности путем устранения неисправностей;
- обновление базы данных путем фиксации новых инцидентов, улучшение модели системы на основе обновленной статистики.

Таким образом, требования к диагностике и восстановлению работоспособности ИУС подвижного состава предполагают переход к интеллектуальным системам, способным быстро и точно реагировать на возникающие сбои и отказы [2–4].

Обзор многоагентных систем для диагностики и восстановления работоспособности ИУС

Многоагентные системы (МАС) являются одним из перспективных подходов для диагностики и восстановления работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава. Многоагентные системы состоят из набора взаимодействующих программных агентов, каждый из которых обладает определенной степенью автономности и выполняет специализированные функции. Благодаря способности к распределенной обработке информации и координации между агентами, МАС обеспечивают гибкость, масштабируемость и устойчивость в условиях сложных и динамичных сред.

Понятие многоагентных систем и их роль в диагностике

Многоагентные системы состоят из нескольких агентов, которые могут быть независимыми программными модулями, моделирующими работу отдельных компонентов или узлов информационно-управляющей системы. Каждый агент в системе:

1. Имеет свою локальную задачу: агенты могут выполнять диагностику на уровне отдельных компонентов (например, двигателей, тормозных систем) или групп компонентов, что позволяет проводить параллельный анализ и ускоряет процесс выявления неисправностей.
2. Работает автономно и адаптивно: агенты обладают механизмами самообучения и могут адаптировать свою работу под изменения в условиях эксплуатации.
3. Обменивается информацией с другими агентами: в случае выявления неисправности или отклонения в работе компонентов агент передает информацию остальным агентам, что способствует более быстрому и точному выявлению проблем на уровне всей системы.

МАС для диагностики информационно-управляющих систем используются для выполнения задач быстрого обнаружения неисправностей и предотвращения их распространения на другие части системы. В условиях подвижного состава, где сбои

могут быстро привести к аварийным ситуациям, такой подход позволяет повысить надежность и снизить риски [5].

Примеры применений многоагентных систем в транспортных и информационно-управляющих системах

Применение многоагентных систем в транспортных и информационно-управляющих системах становится все более популярным, так как они предлагают распределенное и устойчивое решение для сложных задач диагностики. Приведем примеры применения.

На железнодорожном транспорте диагностика может осуществляться в режиме реального времени путем установки «агентов», отвечающих за мониторинг различных узлов, таких как тормозные системы, двигатели и системы охлаждения.

На автотранспорте диагностика, осуществляемая «агентами», контролирует работу отдельных компонентов, например двигателей, батареи или системы безопасности, позволяя автоматически проверять состояние транспортного средства и прогнозировать необходимость технического обслуживания.

В авиации программные модули помогают следить за различными системами, снижая вероятность отказа в процессе полета.

Преимущества и недостатки многоагентных систем для диагностики и восстановления работоспособности подвижного состава

Преимущества использования МАС в диагностике ИУС подвижного состава (ПС) [6]:

1. Одновременный анализ данных из различных узлов позволяет сократить время диагностирования и повысить точность диагноза.
2. Программные модули работают, независимо друг от друга снижая вероятность сбоев системы диагностирования.
3. МАС легко масштабируются. Это означает, что в любой момент при необходимости можно добавить новых агентов, расширив число контролируемых элементов и возможных технических состояний ИУС.

Недостатки МАС:

1. Для совместной работы необходимо создавать сложные алгоритмы координации функционирования агентов, что, как следствие, потребует больших вычислительных ресурсов.

2. Чем больше агентов, тем больше данных, а это означает что необходима надежная инфраструктура для их передачи и обработки.

3. Чем сложнее условия функционирования ИУС, тем выше требования к процессам самообучения систем, а значит, увеличивается сложность их разработки.

Исходя из вышеперечисленных преимуществ и недостатков можно сделать вывод, что МАС обладают большим потенциалом в диагностике и восстановлении ИУС ПС. Они смогут повысить надежность и адаптивность, однако их разработка связана с рядом сложностей: ограничения в вычислительных ресурсах и разветвленная инфраструктура передачи данных.

Задачи, решаемые с помощью многоагентного подхода на транспорте

Многоагентные модели используются для моделирования транспортных потоков при однополосном движении. В основе подходов лежит концепция «о желании придерживаться при движении безопасной дистанции до лидера». Например, в работе «Введение в математическое моделирование транспортных потоков» приводится модель оптимальной скорости Нагеля — Шрекенберга, основанная на клеточных автоматах, которая является простейшей. В этой модели на каждом шаге $t \rightarrow t + 1$ состояние всех транспортных средств в системе обновляется в соответствии со следующими правилами (здесь v_n, v_{\max} — скорость, а s_n — координата n -го транспортного средства) [7]:

1) ускорение (отражает тенденцию двигаться как можно быстрее, не превышая максимально допустимую скорость):

$$v_n(m+1) = \min\{v_n(m) + 1, v_{\max}\};$$

2) торможение (гарантирует отсутствие столкновений с впереди идущими автотранспортными средствами):

$$v_n(m+1) = \min\{v_n(m), s_{n+1}(m) - s_n(m) - d\},$$

где $d \sim 7,5$ м;

3) случайные возмущения (учитывают различия в поведении транспортных средств):

$$v_n(m+1) = \begin{cases} \max\{v_n(m) - 1, 0\}, & \text{с вероятностью } p, \\ v_n(m), & \text{с вероятностью } 1 - p; \end{cases}$$

4) движение: $s_n(m+1) = s_n(m) + v_n(m)$.

В работе [8] рассматриваются модели следования за лидерами в небольшие промежутки времени, описывая задачи ускорения и торможения, а также задачи дискретного выбора, возникающие в ответ на транспортный поток. Каждый агент использует свой стиль вождения исходя из следующих параметров: время реакции, желаемая скорость и т. п., а также используются внутренние характеристики агента, необходимые для описания опыта водителя. Учитываются внешние воздействия на систему, поскольку они будут влиять на состояние и поведение агента в различных ситуациях.

Использование нейросетевых технологий для интеллектуального диагностирования

Технология нейронных сетей стала одним из наиболее востребованных инструментов для интеллектуальной диагностики в системах управления информацией о железнодорожных транспортных средствах. Способность нейронных сетей изучать и выявлять скрытые закономерности в больших объемах данных делает их ценным компонентом для анализа сложных систем, обладающим высокой степенью согласованности и совместимости с существующими техническими средствами контроля и диагностирования ИУС [9]. В случае железнодорожных транспортных средств нейронные сети могут обрабатывать данные с нескольких датчиков и обнаруживать неисправности предсказуемо рано, что значительно снижает риск внезапных отказов и повышает безопасность эксплуатации ИУС.

Одним из наиболее эффективных приложений нейронных сетей для диагностики ИУС является прогнозирование отказов на основе данных в

реальном времени. На основе анализа этих данных нейронная сеть может выявлять нарушения в работе различных узлов, таких как тормозные системы, двигатели и электрооборудование. Это возможно благодаря глубокому обучению, которое позволяет сети обнаруживать неявные модели поведения системы и делать выводы о возможных отклонениях [10]. Например, такие улучшения, как рекуррентные нейронные сети (Recurrent neural network, RNN) и длинная цепь элементов краткосрочной памяти (Long short-term memory, LTSM), могут анализировать данные временных рядов и прогнозировать будущее состояние компонентов системы, что важно для своевременных мер по предотвращению сбоев и отказов ИУС.

Технология нейронных сетей также позволяет создавать адаптивные диагностические системы, которые могут повысить точность прогнозирования и диагностики с течением времени. Нейронные сети, извлекающие уроки из прошлых данных, могут распознавать распространенные неисправности и адаптироваться к новым условиям вождения, что делает их пригодными для использования в транспортных средствах, движущихся в сложных и изменяющихся условиях. Например, сверточные нейронные сети (Convolutional neural network, CNN) могут эффективно осуществлять обработку больших объемов данных с датчиков изображения и могут помочь в визуальном осмотре деталей транспортных средств, таких как колеса, кузов, тормозные системы и токоприемники [2, 3, 11].

Внедрение технологии нейронных сетей в диагностику требует не только обработки больших данных, но и создания надежной инфраструктуры для их хранения и анализа. В этом контексте востребованы облачные вычисления и распределенные базы данных, которые могут хранить и обрабатывать данные в режиме реального времени. Облачная платформа создает возможности для удаленного управления и мониторинга транспортных средств, позволяя проводить диагностику и ремонт удаленно, уменьшая необходимость вмешательства человека и

ускоряя процесс восстановления работоспособности системы.

Основными преимуществами технологии нейронных сетей в диагностике транспортных средств являются высокая точность, скорость обработки данных и способность к самообучению. Однако в некоторых случаях, таких как потребность в больших вычислительных ресурсах или сложность настройки модели для работы в режиме реального времени, ошибки могут возникать из-за отсутствия обучающих данных или неправильных настроек сети. В этом случае необходимы точная настройка и дополнительные меры для повышения надежности и точности модели. Таким образом, использование технологии нейронных сетей позволяет не только точно и своевременно прогнозировать возможные сбои, но и гибко адаптироваться к новым условиям эксплуатации, что значительно увеличивает вероятность правильных решений (диагнозов) интеллектуальной диагностики. Это позволяет объединить преимущества обеих технологий для повышения надежности и эффективности диагностики и восстановления работоспособности ИУС транспортных средств на основе новых алгоритмов обучения распознаванию и поиску оптимальных решений [11–13].

Заключение

Приведен обзор интеллектуальных подходов к диагностированию и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава на основе многоагентных и нейросетевых технологий. Современные транспортные системы предъявляют высокие требования к надежности и скорости реагирования на неисправности, что делает традиционные методы диагностики и ремонта менее эффективными в условиях усложнения оборудования и увеличения объемов данных. Интеллектуальные системы, использующие многоагентные архитектуры и нейросетевые алгоритмы, предлагают эффективные решения для удовлетворения этих требований, объединяя преимущества распределенной диагностики, автоматизированного анализа и самообучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кон Е. Л., Кулагина М. М. Надежность и диагностика компонентов инфокоммуникационных и информационно-управляющих систем: учебное пособие. Пермь: Пермский нац. исслед. политехн. ун-т, 2012. 395 с.
2. Язынин В. С., Барановский А. М. Модель информационной системы контроля характеристик токоприемника на основе применения 3D-сканирования и нейросетевых технологий // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, Россия, 17–24 апреля 2023 г.): в 2 т. Т. 1. СПб.: ПГУПС, 2023. С. 97–102.
3. Язынин В. С., Барановский А. М., Забродин А. В. Модель системы дистанционного контроля состояния электроподвижного состава с применением искусственных нейронных сетей // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 1 (33). С. 27–37. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37.
4. Харченко В. С., Эльяси Комари И., Горбенко А. В. Оценка надежности информационно-управляющих систем на основе иерархических FME(C)A-таблиц и марковских цепей: модели, методика и информационная технология // Научные ведомости Белгородского государственного университета. История. Политология. Экономика. Информатика. 2011. № 19 (114), Вып. 20/1. С. 169–178.
5. Исаев И. Д. Многоагентные системы, алгоритм распознавания образов интеллектуальными агентами // Вестник науки. 2023. № 11 (68), Т. 4. С. 651–659.
6. Алибеков Б. И., Мамаев Э. А. Мультиагентные системы в логистике: информационно-аналитические аспекты // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2017. Т. 32, Вып. 4. С. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62.
7. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие / под ред. А. В. Гасникова. 2-е изд., испр. и доп. М.: МЦНМО, 2013. 428 с.
8. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Agents for Traffic Simulation // Multi-Agent Systems: Simulation and Applications / A. M. Uhrmacher, D. Weyns (eds.). Boca Raton (FL): CRC Press, 2009. Pp. 325–356.
9. Бочков А. П., Барановский А. М., Гильванов Р. Г. Оценка согласованности и совместимости технических систем в составе сложных организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 284–301. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109.
10. Выучейская М. В., Крайнова И. Н., Грибанов А. В. Нейросетевые технологии в диагностике заболеваний (обзор) // Журнал медико-биологических исследований. 2018. Т. 6, № 3. С. 284–294. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2018.6.3.284.
11. Использование искусственных нейронных сетей на Российских железных дорогах для контроля токоприемников поездов / В. С. Язынин, А. М. Барановский, А. А. Воробьев, И. Ю. Романова // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2023. Т. 13, № 1. С. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287.
12. Хамидулин Т. Г. Применение искусственных нейронных сетей в транспортной отрасли / Т. Г. Хамидулин; науч. рук. О. С. Козлова // Экономика и социум. 2019. № 4 (59). С. 851–858.
13. Adapted Model Neural-Like Hopfield Network and the Algorithm of Its Training for Finding the Roots Systems of Linear Algebraic Equations / A. P. Gluhov, A. M. Baranovskiy, Y. S. Fomenko, A. P. Bochkov // Artificial Intelligence in Intelligent Systems (CSOC 2021): Proceedings of the 10th Computer Science On-line Conference 2021 (Zlín, Czech Republic, April 2021) / R. Silhavy (ed.). Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 229. Cham: Springer Nature, 2021. Pp. 386–395. DOI: 10.1007/978-3-030-77445-5_36.

Дата поступления: 11.02.2025

Решение о публикации: 20.02.2025

Modern Approaches to Diagnostics and Recovery of Rolling Stock Information Management Systems Using Multi-Agent and Neural Network Technologies

Anatoly M. Baranovsky

— PhD in Engineering, Associate Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information and control systems, monitoring, diagnostics and management of technical condition, neural networks. E-mail: bamvka@mail.ru

Daniil A. Bobrikov

— Master's Degree, Postgraduate Student of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, processing of large data. E-mail: daniil20001210@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Baranovsky A. M., Bobrikov D. A. Modern Approaches to Diagnostics and Recovery of Rolling Stock Information Management Systems Using Multi-Agent and Neural Network Technologies. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 1 (41), pp. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13. (In Russian)

Abstract. *The article considers modern approaches to diagnostics and recovery of the rolling stock information management systems (IMS). **Introduction:** in the context of increasing demands on the transport system reliability and safety, traditional diagnostic methods are becoming ineffective. **Purpose:** to explore the possibilities of using multi-agent and neural network technologies to improve the IMS diagnostics and recovery efficiency on the rolling stock. **Methods:** the paper analyzes multi-agent systems that provide distributed diagnostics where agents interact for malfunction detection and localization. Neural network technologies that ensure high accuracy of fault prediction through the analysis of large amounts of data and self-learning are also being investigated. Results: the main result is to identify the potential for integrating multi-agent and neural network technologies. Their combined use can significantly increase the reliability, adaptability and autonomy of the rolling stock IMS. **Discussion:** the prospects of creating hybrid systems combining multi-agent and neural network methods are discussed. Their advantages and limitations are considered and the potential for further improvement of transport system IMS is illustrated.*

Keywords: multi-agent systems, neural network technologies, transport, information control systems, automation

REFERENCES

1. Kon E. L., Kulagina M. M. Nadezhnost i diagnostika komponentov infokommunikatsionnykh i informatsionno-upravlyayushchikh sistem: uchebnoe posobie [Reliability and diagnostics of components of infocommunication and information-control systems: A tutorial]. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2012, 395 p. (In Russian)
2. Yazynin V. S., Baranovsky A. M. Model informatsionnoy sistemy kontrolya kharakteristik tokopriemnika na osnove primeneniya 3D-skanirovaniya i neyrosetevykh tekhnologiy [Model of an Information System for Monitoring the Characteristics of a Pantograph Based on the Use of 3D Scanning and Neural Network Technologies], *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the LXXXIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists]*, Saint Petersburg, Russia, April 17–24, 2023. Vol. 1. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University, 2023, Pp. 97–102. (In Russian)
3. Yazynin V. S., Baranovsky A. M., Zabrodin A. V. Model sistemy distantsionnogo kontrolya sostoyaniya elektropodvizhnogo sostava s primeneniem iskusstvennykh neyronnykh setey [The Model of Remote Monitoring System for Electric Rolling Stock Condition Using Artificial Neural Networks], *Intellektualnye tekhnologii na transporte*

[*Intellectual Technologies on Transport*], 2023, No. 1 (33), Pp. 27–37. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-27-37. (In Russian)

4. Kharchenko V. S., Elyasi Komari I., Gorbenko A. V. Otsenka nadezhnosti informatsionno-upravlyayushchikh sistem na osnove ierarkhicheskikh FME(C)A-tablits i markovskikh tsepey: modeli, metodika i informatsionnaya tekhnologiya [Instrumentation and Control Systems Dependability Assessment Using Hierarchical FME(C)A-Tables and Markov's Chains: Models, Technique and Information Technology], *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin. History. Political Science. Economics. Information Technologies], 2011, No. 19 (114), Iss. 20/1, Pp. 169–178. (In Russian)

5. Isaev I. D. Mnogoagentnye sistemy, algoritm raspoznavaniya obrazov intellektualnymi agentami [Multi-Agent Systems, Algorithm for Pattern Recognition by Intelligent Agents], *Vestnik Nauki*, 2023, No. 11 (68), Vol. 4, Pp. 651–659. (In Russian)

6. Alibekov B. I., Mamaev E. A. Multiagentnye sistemy v logistike: informatsionno-analiticheskie aspekty [Multi-Agent Systems of Logistics: Information and Analytical Aspects], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Estestvennyye nauki* [Herald of Dagestan State University. Series 1. Natural Sciences], 2017, Vol. 32, Iss. 4, Pp. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62. (In Russian)

7. Gasnikov A. V. (ed.) Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov: uchebnoe posobie [Introduction to mathematical modeling of traffic flows: A tutorial]. Moscow, Moscow Center for Continuous Mathematical Education, 2013, 428 p. (In Russian)

8. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Agents for Traffic Simulation. In: *Uhrmacher A. M., Weyns D. (eds.) Multi-Agent Systems: Simulation and Applications*. Boca Raton (FL), CRC Press, 2009, Pp. 325–356.

9. Bochkov A. P., Baranovskii A. M., Gilvanov R. G. Otsenka soglasovannosti i sovместimosti tekhnicheskikh sistem v sostave slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistem [Assessment of Consistency and Compatibility of Technical Systems in Complex Organizational and Technical Systems], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2020, No. 1, Pp. 284–301. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109 (In Russian)

10. Vyucheyanskaya M. V., Kraynova I. N., Gribanov A. V. Neyrosetevye tekhnologii v diagnostike zabolevaniy (obzor) [Neural Network Technologies in Medical Diagnosis (Review)], *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy* [Journal of Medical and Biological Research], 2018, Vol. 6, No. 3, Pp. 284–294. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2018.6.3.284. (In Russian)

11. Yazinin V. S., Baranovskiy A. M., Vorobyev A. A., Romanova I. Yu. Ispolzovanie iskusstvennykh neyronnykh setey na Rossiyskikh zheleznykh dorogakh dlya kontrolya tokopriemnikov poezdov [The Use of Artificial Neural Networks on Russian Railways to Control Current Collectors of Trains], *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*, 2023, Vol. 13, No. 1, Pp. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287. (In Russian)

12. Khamidulin T. G. Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey v transportnoy otrasli [Application of Artificial Neural Networks in the Transport Industry], *Ekonomika i sotsium* [Economics and Society], 2019, No. 4 (59), Pp. 851–858. (In Russian)

13. Gluhov A. P., Baranovskiy A. M., Fomenko Y. S., Bochkov A. P. Adapted Model Neural-Like Hopfield Network and the Algorithm of Its Training for Finding the Roots Systems of Linear Algebraic Equations. In: *Silhavy R. (ed.) Artificial Intelligence in Intelligent Systems (CSOC 2021): Proceedings of the 10th Computer Science On-line Conference 2021 (Zlín, Czech Republic, April 2021), Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 229. Cham, Springer Nature, 2021, Pp. 386–395. DOI: 10.1007/978-3-030-77445-5_36.

Received: 11.02.2025

Accepted: 20.02.2025