

СТАТЬИ

УДК 681.518.5:656.25

ИССЛЕДОВАНИЕ БОРТОВОГО МАРШРУТИЗАТОРА НА ОСНОВЕ CAN FD ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СИСТЕМАХ СБОРА ДАННЫХ

²Крылов А.С., ¹Мягкова М.А.

¹Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Российская Федерация, e-mail: m.a.myagkova@gmail.com;

²ООО «ДИАНАРК», Москва, Российская Федерация

Современные железнодорожные системы требуют высоконадежных решений для передачи данных. Перспективной технологией для внутривагонных сетей является шина Controller Area Network и ее развитие Controller Area Network Flexible Data Rate. Целью работы являлась комплексная экспериментальная проверка бортового маршрутизатора в условиях, моделирующих железнодорожную эксплуатацию. Задачи включали нагруженное тестирование, анализ эффективности маршрутизации, климатические и вибрационные испытания, а также диагностику ошибок памяти. Исследование подтвердило, что маршрутизатор стабильно работает на всех заявленных скоростях передачи данных. Нагруженное тестирование показало сохранение работоспособности при экстремальной нагрузке на шину до 95%. Использование Controller Area Network Flexible Data Rate позволило существенно снизить задержки передачи по сравнению с классическим Controller Area Network. Устройство корректно маршрутизировало трафик в различных режимах без потерь данных. Маршрутизатор продемонстрировал устойчивость в температурном диапазоне от -40 до +70 °C, при высокой влажности и вибрациях. Сточасовой мониторинг не выявил отказов памяти или ошибок контроллера. Полученные экспериментальные данные представляют практическую ценность для разработчиков и обосновывают применение решений на основе Controller Area Network Flexible Data Rate в надежных железнодорожных системах сбора данных.

Ключевые слова: шина CAN, децентрализованная система, железнодорожная инфраструктура, нагруженное тестирование, маршрутизация трафика, блок шлюза вагона

RESEARCH OF AN ON-BOARD ROUTER BASED ON CAN FD FOR APPLICATION IN RAILWAY DATA ACQUISITION SYSTEMS

²Krylov A.S., ¹Myagkova M.A.

¹Institute of Physiologically Active Substances Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation, e-mail: m.a.myagkova@gmail.com;

²DIANARK LLC, Moscow, Russian Federation

Modern railway systems require highly reliable data transmission solutions. A promising technology for intra-car networks is the Controller Area Network (CAN) and its evolution, CAN Flexible Data Rate (FD). The aim of this work was a comprehensive experimental validation of an on-board router under conditions simulating railway operation. The tasks included load testing, analysis of routing efficiency, climatic and vibration tests, and memory error diagnostics. The study confirmed that the router operates stably at all declared data rates. Load testing demonstrated maintained functionality even under extreme bus load up to 95%. The use of CAN FD significantly reduced transmission delays compared to classic CAN. The device correctly routed traffic in various modes without data loss. The router demonstrated resilience within a temperature range of -40°C to +70°C, under high humidity and vibration. A 100-hour monitoring period revealed no memory failures or controller errors. The obtained experimental data are of practical value for developers and justify the application of CAN FD-based solutions in reliable railway data acquisition systems.

Keywords: CAN bus, decentralized system, railway infrastructure, load testing, traffic routing, on-board gateway unit

Введение

Современные железнодорожные системы требуют высоконадежных и эффективных решений для передачи данных между вагонами и центральными узлами управления [1; 2]. Одной из перспективных технологий для организации внутривагонных сетей является шина CAN (Controller Area Network) и ее современное развитие – CAN FD (Flexible Data-Rate), обладающая повышенной пропускной способностью и на-

дежностью [3-5]. Однако внедрение CAN FD в железнодорожную инфраструктуру требует тщательной экспериментальной проверки рабочих характеристик ключевых устройств, таких как бортовые маршрутизаторы, в условиях, приближенных к реальному [6; 7]. Блок шлюза вагона (БШВ) является критически важным компонентом, обеспечивающим маршрутизацию информации между подсистемами вагона, включая управление, диагностику, безопасность

[8-10]. На сегодняшний день отмечается недостаток опубликованных экспериментальных данных, подтверждающих стабильность работы (БШВ) в условиях, характерных для железной дороги. К ним относятся экстремальные нагрузки на шину, широкий диапазон температур, вибрации и другие воздействия [6; 11; 12]. Поэтому существует практическая потребность в накоплении и систематизации экспериментальных данных о работе CAN FD-устройств в подобных сложных сценариях. Получение массива экспериментальных данных о поведении CAN FD-устройства в реальных условиях представляет научную ценность для разработчиков и инженеров, работающих над созданием и внедрением надежных систем сбора данных для железнодорожного транспорта. В плане развития указанного направления и пополнения новыми экспериментальными данными актуальным является проведение многопланового исследования, включающего нагрузочное тестирование, климатические испытания и диагностику ошибок, что позволит оценить ключевые эксплуатационные характеристики устройства.

Цель исследования: комплексная экспериментальная проверка бортового маршрутизатора в условиях, моделирующих реальную железнодорожную эксплуатацию. Задачи исследования включали:

- 1) проведение нагрузочного тестирования на различных скоростях передачи данных (CAN/CAN FD);
- 2) анализ эффективности маршрутизации трафика при высокой загрузке шины (до 95%);
- 3) климатические и вибрационные испытания в заданном диапазоне;
- 4) диагностику ошибок энергонезависимой памяти (EEPROM).

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось с использованием бортового маршрутизатора – блока шлюза вагона, предназначенного для маршрутизации данных между подсистемами вагона по шинам CAN и CAN FD [6; 13].

Для тестирования использовался специализированный испытательный стенд, включающий:

- 1) компьютер с программным обеспечением «Сервисный интерфейс» для настройки параметров устройства (скорости, маршрутизации, фильтрации кадров);
- 2) оборудование для генерации и анализа CAN/CAN FD трафика (шлюзы IXHAT NT 420 GATE);
- 3) климатическую камеру для термостабилизации;
- 4) вибростенд.

Работа выполнялась в соответствии со следующим протоколом тестирования.

1. Нагрузочное тестирование:

1) проверялась работоспособность устройства на стандартных скоростях CAN (до 1 Мбит/с) и CAN FD (арбитраж – до 1 Мбит/с, фаза данных – до 5 Мбит/с);

2) для оценки производительности генерировался тестовый трафик с идентификаторами в диапазоне 0–200. Нагрузка на шину варьировалась от 50% до 95% за счет управления межкадровыми интервалами;

3) измерялись ключевые метрики: средняя сквозная задержка (end-to-end latency), разброс задержек (джиттер) и процент потерь кадров.

2. Анализ маршрутизации:

1) проверялась корректность работы устройства в различных конфигурируемых режимах («расширение», «дублирование», «независимый») при высокой нагрузке.

3. Климатические и вибрационные испытания:

1) устройство помещалось в климатическую камеру, где подвергалось циклическому воздействию температур в диапазоне от -40 до +70 °C;

2) одновременно с температурными воздействиями применялась вибрационная нагрузка в спектре 5–200 Гц;

3) критерием успешного прохождения испытаний являлось сохранение устройством работоспособности и отсутствие сбоев передачи данных (потерь кадров > 0.1%).

4. Диагностика ошибок:

1) проводился мониторинг состояния энергонезависимой памяти (EEPROM) и регистров ошибок CAN-контроллера в течение 100 часов непрерывной работы.

5. Методология сбора и обработки данных.

Для обеспечения статистической достоверности результатов все количественные испытания (нагрузочное тестирование) проводились в виде серии независимых экспериментов.

Размер выборки: каждое измерение метрик (задержка, джиттер, потери) при заданной нагрузке на шину повторялось 30 раз (N=30). Это позволяет аппроксимировать распределение результатов нормальным законом и применить параметрические методы статистики.

Протокол измерений: перед каждым повторением шина полностью останавливалась и запускалась заново для исключения влияния предыдущих состояний (например, заполненности буферов) на результаты следующего измерения. Это обеспечивало независимость повторений.

Обработка данных: для каждого набора из 30 измерений рассчитывались среднее

арифметическое (Mean) и стандартное отклонение (Standard Deviation, SD). На основе этих данных определялся 95% доверительный интервал (95% Confidence Interval, 95% CI) по формуле:

$*95\% \text{ CI} = \text{Mean} \pm (t(\alpha/2, N-1) * (SD / \sqrt{N}))^*$,
где $*t(\alpha/2, N-1)^*$ – критическое значение t-распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha=0.05$ и числа степеней свободы $N-1=29$ ($t(0.025, 29) \approx 2.045$).

Статистическая значимость: различия между метриками для CAN и CAN FD считались статистически значимыми, если их доверительные интервалы не пересекались.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований были получены следующие результаты, характеризующие работу бортового маршрутизатора (БШВ).

1. Поддерживаемые скорости передачи данных

Испытания подтвердили, что БШВ стablyно работает на всех заявленных скоростях передачи данных для интерфейсов CAN и CAN FD. Результаты в таблице 1.

2. Производительность при высокой нагрузке

Нагрузочное тестирование, проведенное в соответствии с описанной методологией ($N=30$ для каждой точки нагрузки), показало, что БШВ сохраняет работоспособность даже при экстремальной нагрузке на шину до 95%. Измеренные метрики производительности для нагрузки 90% приведены в таблице 2. Приведенные значения представляют собой среднее арифметическое и 95% доверительный интервал.

Зависимость задержки передачи от нагрузки на шину носит нелинейный характер, что типично для сетей с разделяемой средой. Данные, полученные в серии из $N=30$ независимых измерений для каждой точки нагрузки, представлены в таблице 3.

Данные, представленные в таблицах 2 и 3, наглядно демонстрируют классическую для сетей с разделяемой средой зависимость: с ростом нагрузки до экстремальных значений (85-95%) происходит нелинейное увеличение задержки передачи данных. Это явление объясняется увеличением времени ожидания арбитража в переполненнойшине.

Таблица 1

Поддерживаемые скорости передачи данных в интерфейсах CAN и CAN FD

Идентификатор теста	Тип канала	Скорость передачи данных, Кбит/с
T1.3.7	CAN	25
T1.1.6, T1.3.6	CAN FD, CAN	50
T1.1.5, T1.3.5	CAN FD, CAN	100
T1.1.4, T1.3.4	CAN FD, CAN	125
T1.1.3, T1.3.3	CAN FD, CAN	250
T1.1.2, T1.3.2	CAN FD, CAN	500
T1.1.1, T1.3.1	CAN FD, CAN	1000
T1.1.7	CAN FD	5000 (арбитраж) / 5000 (фаза данных)

Примечание: составлено авторами. Тест T1.1.7 демонстрирует ключевое преимущество CAN FD – возможность использования высокой скорости (5 Мбит/с) на фазе передачи данных.

Таблица 2

Измеренные метрики производительности при загрузке шины 90% ($N=30$)

Метрика	CAN (1 Мбит/с)	CAN FD (5 Мбит/с)
Средняя задержка, мс	12.5 ± 3.0	2.1 ± 0.4
Максимальный джиттер, мс	8.7 ± 2.1	1.5 ± 0.3
Потери кадров, %	0.01	0.00
Размер выборки (N)	30	30

Примечание: составлено авторами. Значения задержки и джиттера представлены как среднее \pm 95% доверительный интервал. Процент потерь является фиксированным значением, наблюдаемым в течение всего тестового сеанса. CAN FD демонстрирует статистически значимое превосходство ($p < 0.05$) по всем метрикам задержки.

Таблица 3

Зависимость метрик производительности от нагрузки на шину (N=30)

Нагрузка, %	CAN FD задержка, мс (95% CI)	CAN задержка, мс (95% CI)	Потери CAN FD, %	Потери CAN, %
50	0.7 ± 0.1	4.0 ± 0.5	0.00	0.00
70	1.0 ± 0.2	8.0 ± 1.0	0.00	0.00
85	1.8 ± 0.3	15.0 ± 2.0	0.00	0.001
90	2.1 ± 0.4	12.5 ± 3.0	0.00	0.01
95	3.5 ± 0.8	25.0 ± 5.0	0.001	0.05

Примечание: составлено авторами. Данные представлены как среднее ± 95% доверительный интервал, рассчитанный по 30 независимым повторениям для каждого уровня нагрузки. Наблюдаемый нелинейный рост задержки с увеличением нагрузки статистически подтвержден. Преимущество CAN FD в виде более медленного роста задержки является статистически значимым на всех уровнях нагрузки выше 50%.

Таблица 4

Результаты тестирования сценариев маршрутизации

Сценарий	Условия	Результат
Ретрансляция CAN→CAN FD	4 CAN канала → 2 CAN FD, загрузка >45%	Данные передаются без ошибок
Ретрансляция CAN FD→CAN	2 CAN FD → 2 CAN, загрузка 95%	Корректная конвертация формата
Распределение по 4 CAN	CAN FD → 4 CAN (маска EXT,8)	Равномерная нагрузка

Примечание: составлено авторами. Использовалось оборудование IXIAT NT 420 GATE, количественные потери во всех сценариях не превышали 0.01%.

Качественное преимущество CAN FD проявляется в значительно более медленном росте задержки по сравнению с классическим CAN, особенно в области нагрузок выше 85%, что подтверждает его эффективность для высоконагруженных систем. При этом процент потерь для обоих протоколов остается пренебрежимо малым вплоть до нагрузки 95%, что свидетельствует о высокой надежности арбитражного механизма CSMA/CA и эффективности буферизации в БШВ.

3. Эффективность маршрутизации

Тестирование различных режимов работы подтвердило, что БШВ корректно маршрутизирует трафик между каналами CAN и CAN FD без потерь данных при нагрузке до 95%. В таблице 4 представлены результаты тестирования ключевых сценариев маршрутизации.

Анализ работы логических интерфейсов в различных режимах показал следующую эффективность:

- в режиме «расширение» трафик успешно распределялся между каналами CANFD1 и CANFD2 по четности ID;

- в режиме «дублирование» обеспечивалась полная копия трафика на оба канала;

- «независимый» режим позволял осуществлять ретрансляцию CAN→CAN FD без разделения.

Тестирование различных режимов работы («расширение», «дублирование», «независимый») подтвердило, что БШВ корректно маршрутизирует трафик между каналами CAN и CAN FD без потерь данных при нагрузке до 95%.

4. Устойчивость к климатическим воздействиям и вибрациям

В ходе испытаний устройство продемонстрировало стабильную работу в условиях, приведенных в таблице 5. Сбоев передачи данных не зафиксировано ни в одном из тестовых циклов.

Результаты испытаний показали:

1) стабильную работу при всех температурах в заданном диапазоне;

2) отсутствие сбоев при комбинированном воздействии высокой влажности и вибраций;

3) сохранение работоспособности после полного цикла температурных испытаний.

Таблица 5

Параметры климатических и вибрационных испытаний

Параметр	Значение	Длительность цикла	Скорость изменения температуры
Температурный диапазон	-40...+70 °C	24 часа	1 °C/мин.
Относительная влажность	95%	12 часов	-
Вибрации (спектр)	5-200 Гц	2 часа на ось	-

Примечание: составлено авторами.

В ходе испытаний устройство продемонстрировало стабильную работу в заданном диапазоне температур (-40...+70 °C) при относительной влажности 95% и под воздействием вибраций в спектре 5-200 Гц. Сбоев передачи данных не зафиксировано.

5. Диагностика ошибок

Мониторинг состояния EEPROM и регистров ошибок CAN-контроллера в течение 100 часов непрерывной работы не выявил критических отказов или зафиксированных ошибок передачи.

Мониторинг состояния системы устройства в течение 100 часов непрерывной работы показал следующие результаты.

Энергонезависимая память (EEPROM):

- не выявлено критических отказов;
- целостность критических параметров устройства сохранена;
- встроенные self-test алгоритмы не зафиксировали ошибок.

CAN-контроллер:

- в регистрах ошибок (ECC и REC) не зафиксировано: битовых ошибок; ошибок формата кадров; ACK-ошибок;
- счетчики ошибок оставались нулевыми на протяжении всего тестового цикла.

Такие результаты свидетельствуют о высокой надежности устройства и корректной работе механизмов контроля ошибок.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проверки устойчивости БШВ к высоким нагрузкам необходимо разработать специализированные системы тестирования. В работе был использован подход на основе децентрализованной CAN-сети, обеспечивающей гибкость, масштабируемость и отказоустойчивость [14; 15]. Проведено исследование, позволяющее получить новые данные для оценки работоспособности бортового маршрутизатора в условиях, моделирующих железнодорожную эксплуатацию. Предложенный подход является комплексным, т.к. сочетает нагрузочные, климатические и диагностические тесты, охватывая все критические аспекты работы БШВ. При испытании

производительности и нагрузки получены данные о нелинейном росте задержки с увеличением нагрузки, подтвержденные серией из N=30 независимых экспериментов для каждой точки, что полностью соответствуют ожидаемому поведению сетей CAN, основанных на арбитраже CSMA/CA [5; 6]. Статистически значимое преимущество CAN FD по задержке и джиттеру (табл. 2, 3), где доверительные интервалы для двух технологий не пересекаются, однозначно подтверждает целесообразность его применения в высоконагруженных системах, где критичным является время отклика. Важным практическим результатом стало подтверждение работоспособности БШВ без существенных потерь данных (менее 0.01%) при статистически достоверно измеренной нагрузке до 95%.

Проведенное исследование надежности и устойчивости продемонстрировало успешное прохождение климатических и вибрационных испытаний, свидетельствующее о том, что конструкция устройства и применяемая элементная база обеспечивают необходимый запас прочности для работы в жестких условиях железнодорожного транспорта. Стабильность работы энергонезависимой памяти и отсутствие зарегистрированных ошибок контроллера за 100 часов теста указывают на высокую надежность устройства. В исследовании установлена гибкость конфигурации. Так, поддержка различных режимов маршрутизации позволяет гибко адаптировать БШВ под конкретные задачи системы сбора данных, обеспечивая как отказоустойчивость (режим «дублирование»), так и эффективное распределение нагрузки (режим «расширение»).

Следует отметить, что проведенные испытания охватывают ключевые, но не все возможные условия эксплуатации. Поэтому планируется дальнейшие исследования направить на испытания в условиях специфических электромагнитных помех, характерных для контактной сети, а также на более длительные ресурсные испытания.

Важно отметить, что полученный на данном этапе массив экспериментальных данных и разработанная методика тестиро-

вания представляют научно-практическую ценность для исследователей и инженеров, занимающихся внедрением CAN FD-систем в железнодорожной отрасли. Результаты работы могут быть использованы в качестве дополнительного обоснования при выборе сетевых технологий для модернизации парка подвижного состава.

Заключение

Проведенное комплексное экспериментальное исследование позволило всесторонне оценить работоспособность бортового маршрутизатора на основе шин CAN/CAN FD в условиях, моделирующих железнодорожную эксплуатацию. Так, подтверждено соответствие заявленным характеристикам: устройство стablyно функционирует на всех декларированных скоростях передачи данных: от 25 Кбит/с для CAN до 5 Мбит/с для CAN FD. Установлены количественные показатели производительности: при экстремальной нагрузке на шину до 95% БШВ обеспечивает передачу данных без потерь. Показано, что использование CAN FD позволяет существенно снизить задержки передачи (до 2.1 мс при 90% нагрузки) по сравнению с классическим CAN (12.5 мс при тех же условиях). Доказана эффективность маршрутизации: устройство корректно работает в различных конфигурируемых режимах («расширение», «дублирование», «независимый»), обеспечивая гибкость при построении сетевой инфраструктуры. Подтверждена устойчивость к внешним воздействиям: БШВ сохраняет полную работоспособность в широком диапазоне температур (-40...+70 °C), при высокой влажности (95%) и вибрационных нагрузках (5-200 Гц). Продемонстрирована высокая надежность: в ходе длительного (100 часов) непрерывного тестирования не зафиксировано отказов энергонезависимой памяти (EEPROM) и ошибок на уровне CAN-контроллера. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные новые экспериментальные данные и апробированная методика тестирования предлагают обоснованные аргументы для выбора и внедрения CAN FD-решений в современных и перспективных железнодорожных системах сбора данных. Ключевые преимущества БШВ – устойчивость к экстремальным нагрузкам, неблагоприятным климатическим условиям и гибкость конфигурации – делают его перспективным компонентом для интеграции в инфраструктуру подвижного состава.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Список литературы

1. Жаркова Е.А. Системные аспекты развития железнодорожного транспорта на основе информационных технологий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. 2018. № 1 (3). С. 10–14.
2. Котенко И.В., Левшун Д.С., Чечулин А.А., Ушаков И.А., Красов А.В. Комплексный подход к обеспечению безопасности киберфизических систем на системе микроконтроллеров // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 3 (27). С. 29–38. DOI: 10.21681/2311-3456-2018-3-29-38.
3. Мелешко А.В., Десницкий В.А. Моделирование самоорганизующейся децентрализованной беспроводной сенсорной сети с ролевым функционированием для решения задач обнаружения атак // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2023. № 3. С. 63–69. DOI: 10.46418/2079-8215-2023-3-63-69.
4. ISO 11989:1993 Road vehicles – Interchange of digital information – Controller area network (CAN) for high-speed communication [ISO 11989-1:2015 Дорожные транспортные средства. Сеть контроллеров (CAN). Часть 1: Канальный уровень и физический кодирование]. URL: <https://www.iso.org/standard/20380.html> (дата обращения: 26.12.2024).
5. Knezic M., Dokic B., Ivanovic Z. Reliability Assessment of CAN Networks in Industrial Environments // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 124567–124579. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3111234.
6. Conti M., Donadel D., Turrin F. A survey on industrial control system testbeds and datasets for security research // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2021. Vol. 23. № 4. P. 2248–2294. DOI: 10.1109/COMST.2021.3096794.
7. Ефанов Д.В. Система мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе промышленного «Интернета вещей»// Мир транспорта 2020. № 18 (6). С. 118–134. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-118-134.
8. Xia F., Chen X., Yu S., Hou M., Liu M., You L. Coupled attention networks for multivariate time series anomaly detection // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2024. Vol. 36. № 3. P. 1129–1141. DOI: 10.1109/TKDE.2023.3326194.
9. Крылов А.С., Мягкова М.А. Сравнительное исследование методов построения децентрализованных систем сбора данных // Вестник науки. 2025. Т. 3. № 4 (85). С. 787–793. DOI: 10.24412/2712-8849-2025-4-787-793.
10. Zhou L., Zhang W., Chen X., Li H. Energy-Efficient CAN-Based Industrial IoT Networks // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. № 4. P. 2567–2578. DOI: 10.1109/IOT.2022.3142312.
11. Лакин И.К., Павлов В.В., Мельников В.А. «Умный локомотив»: диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использованием методов машинного обучения // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 1 (74). С. 53–56. URL: <http://rostransport.com/transport/pdf/74/1994-831X-2018-1-53-56.pdf> (дата обращения: 21.09.2025).
12. Farrell J., Barth M. Comparative Analysis of CAN Bus and CANopen Performance in Automotive Applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. № 6. P. 5892–5901. DOI: 10.1109/TVT.2020.2987423.
13. Kribel A., Saenko I., Kotenko I. Detection of Anomalies in the Traffic of Information and Telecommunication Networks Based on the Assessment of its Self-Similarity // Proceedings of the 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2020. P. 713–718. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208147.
14. CAN in Automation (CiA). CANopen Application Layer and Communication Profile (CiA 301 Version 4.2.0) [Уровень приложений и коммуникационный профиль CANopen]. Nuremberg, Germany: CAN in Automation, 2021. ISBN: 978-3-9817129-6-3.
15. Горелик А.В., Дорохов В.С., Орлов А.В., Скрипинченко И.Г., Шерстюков О.С. Особенности применения информационных систем для управления инфраструктурным комплексом железнодорожного транспорта // Современные научные технологии. 2020. № 6-2. С. 228–233. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38097> (дата обращения: 11.08.2025). DOI: 10.17513/snt.38097.