

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 629.423

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_121

*А. А. Будаев, Е. А. Третьяков***КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ
ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА**

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования возможных неисправностей в электрической части электровоза на основе технологии цифрового двойника с использованием программного обеспечения *Matlab Simulink*. Для апробации разработанного цифрового двойника электрической части электровоза 2ЭС6 выполнена валидация компьютерной модели на основе ретроспективных данных, измеренных с помощью бортового регистратора параметров движения и автоведения (РПДА). Результаты исследований могут использоваться для машинного обучения модели прогнозирования состояния электроподвижного состава, а именно с целью генерирования набора данных с различными параметрами движения электровоза ввиду малого количества записей реальных поездок с РПДА. Перспективы практического применения полученных результатов связаны с разрабатываемой системой прескриптивного мониторинга и диагностики для автоматического предотвращения неисправностей электроподвижного состава в пути следования.

Ключевые слова: цифровой двойник, электроподвижной состав, имитационная модель, прогнозирование, моделирование, машинное обучение.

Для цитирования: Будаев, А. А. Компьютерное моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза на основе технологии цифрового двойника / А. А. Будаев, Е. А. Третьяков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 121–132. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_121.

Введение и постановка задачи

Согласно паспорту комплексной программы инновационного развития холдинга ОАО «РЖД», на период до 2025 г. к реализации запланированы проекты, направленные на создание интеллектуальных систем управления электроподвижным составом, а также цифровых двойников для предиктивного прогнозирования технического состояния подвижного состава [1]. Как известно, цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального физического объекта, системы или процесса и двусторонних связей, которая может использоваться для моделирования, прогнозирования, тестирования, мониторинга, технического обслуживания и др. Взаимодействие двойника с реальным объектом осуществляется с помощью разнообразных датчиков, систем мониторинга и управления [2–4]. Для предотвращения непредвиденных событий с помощью цифрового двойника можно прогнозировать сбои или аварийные ситуации, а также оказывать поддержку и предлагать возможные действия. Представленные возможности реализации цифрового двойника в рассматриваемом контексте существенно шире текущей предиктивной диагностики электроподвижного состава.

В последние годы в ОАО «РЖД» наблюдается стремительный переход от аналоговых технологий к цифровым, что ведет к развитию методов и способов регистрации, обработки и хранения данных бортовых измерительных систем и информационных связей электроподвижного состава в эксплуатации на весь период его жизненного цикла, а также позволяет создать цифровой двойник магистрального электровоза применительно к исследуемым его частям и процессам.

В настоящее время наблюдается большой интерес отечественных и зарубежных исследователей к вопросам внедрения и использования технологии цифрового двойника на электроподвижном составе. В работах Э. Бернала, Э. Крама, С. Сарпа, А. Альхариса и др. [5–8] представлены функциональные схемы, описывающие методологию построения цифровых двойников. Большое внимание в них уделяется взаимосвязи данной технологии с методами искусственного интеллекта для предиктивного обслуживания электроподвижного состава, а также описаны текущее состояние темы и перспективы ее развития.

В публикациях Д. В. Шевченко, А. Д. Обухова, Е. А. Ларченко, Я. И. Никоновой [9–12] представлены результаты исследований, посвященных разработке и применению цифровых двойников на железнодорожном транспорте для предиктивного обслуживания и ремонта локомотивов. Авторами

выполнен обзор существующих работ, выделены преимущества и проблемы внедрения данной технологии.

В работах [13–14] авторами рассматривается потенциал использования технологии цифрового двойника для реостатных испытаний тепловозов на завершающем этапе ремонта, что позволяет выявлять проблемы в работе дизель-генераторной установки и автоматической системы регулирования мощности тягового генератора, а также для улучшения системы технического обслуживания и ремонта локомотивов с возможностью согласования временных характеристик контуров регулирования мощности тягового генератора. В указанных исследованиях компьютерная цифровая модель подвижного состава авторами не представлена.

В работе [15] авторы используют цифровой двойник с целью формирования оптимальных графиков движения для электровозов постоянного тока. Предлагаемый метод основан на исследованиях свойств цифровой модели электровоза 2ЭС6 для получения уравнений движений поезда и набора тяговых характеристик локомотива. Авторами не представлена разработанная цифровая модель электрической части электроподвижного состава.

Целью настоящего исследования является моделирование возможных неисправностей в электрической части магистрального электровоза 2ЭС6 на основе технологии цифрового двойника для прогнозирования параметров и сценариев развития различных ситуаций и событий по данным бортовых измерительных систем в пути следования.

Основные задачи:

- разработка компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6 на основе технологии цифрового двойника для реализации поставленной цели;
- моделирование некоторых неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 с целью создания набора данных для машинного обучения и поиска допустимых состояний;
- валидация разработанной модели на основе данных с бортовых измерительных систем электроподвижного состава.

Материалы и методы исследования

Для обучения модели машинного обучения необходимо смоделировать наборы данных с возможными неисправностями и различными параметрами движения электровоза благодаря разработанной компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6. Такая необходимость обусловлена малым количеством файлов реальных поездок с бортового регистратора параметров движения и автоведения (РПДА), где имелись различные неисправности и аварийные ситуации в электрической части электроподвижного состава.

Структурная схема обучающегося модуля с описанием взаимодействия технологии цифрового двойника и методов машинного обучения в контексте решаемых задач представлена на рис. 1.

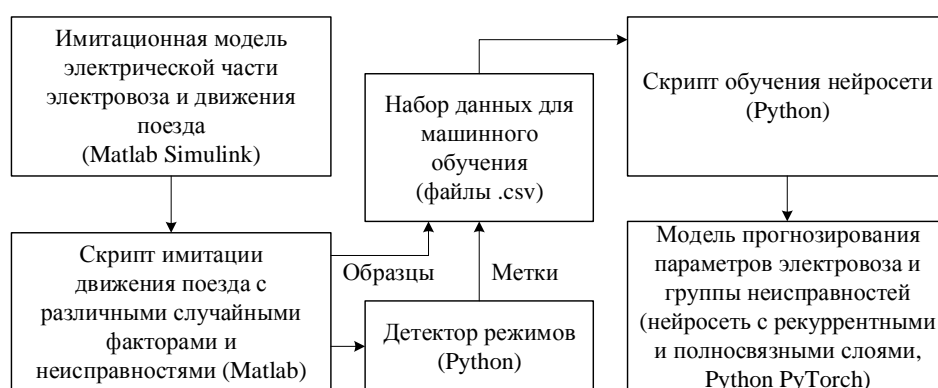


Рис. 1. Структурная схема обучающегося модуля

Представленная схема включает в себя компьютерную цифровую модель электрической части электровоза, а также определенный сценарий (скрипт), с помощью которого происходит запуск имитационной модели с разными параметрами. Скрипт генерирует нужное количество файлов с данными о виртуальных поездках, представляющих собой зависимости параметров движения электровоза от общего времени моделирования. Детектор режимов маркирует каждый файл специальной меткой, которая указывает на наличие или отсутствие неисправностей и недопустимых состояний. Модель прогнозирования параметров электровоза и возможных сценариев развития ситуаций по данным бортовых

измерительных систем в пути следования формируется с помощью методов машинного обучения, где также реализуется поиск допустимых состояний в реальном времени на основе моделирования в рамках прескриптивной диагностики.

Разработка компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6

Компьютерная цифровая модель электрической части электровоза 2ЭС6 для С-СП-П-соединения тяговых электродвигателей (ТЭД) разработана в программном обеспечении *Matlab Simulink* и представлена на рис. 2 [16]. Исходными параметрами являются паспортные данные ТЭД ЭДП810, пусковые и шунтирующие сопротивления силовой цепи, токи уставок коммутационного оборудования, а также дискретные данные (напряжение на токоприемнике, позиции переключения пускового реостата, сила тяги и токи возбуждения ТЭД) с бортовых систем РПДА.

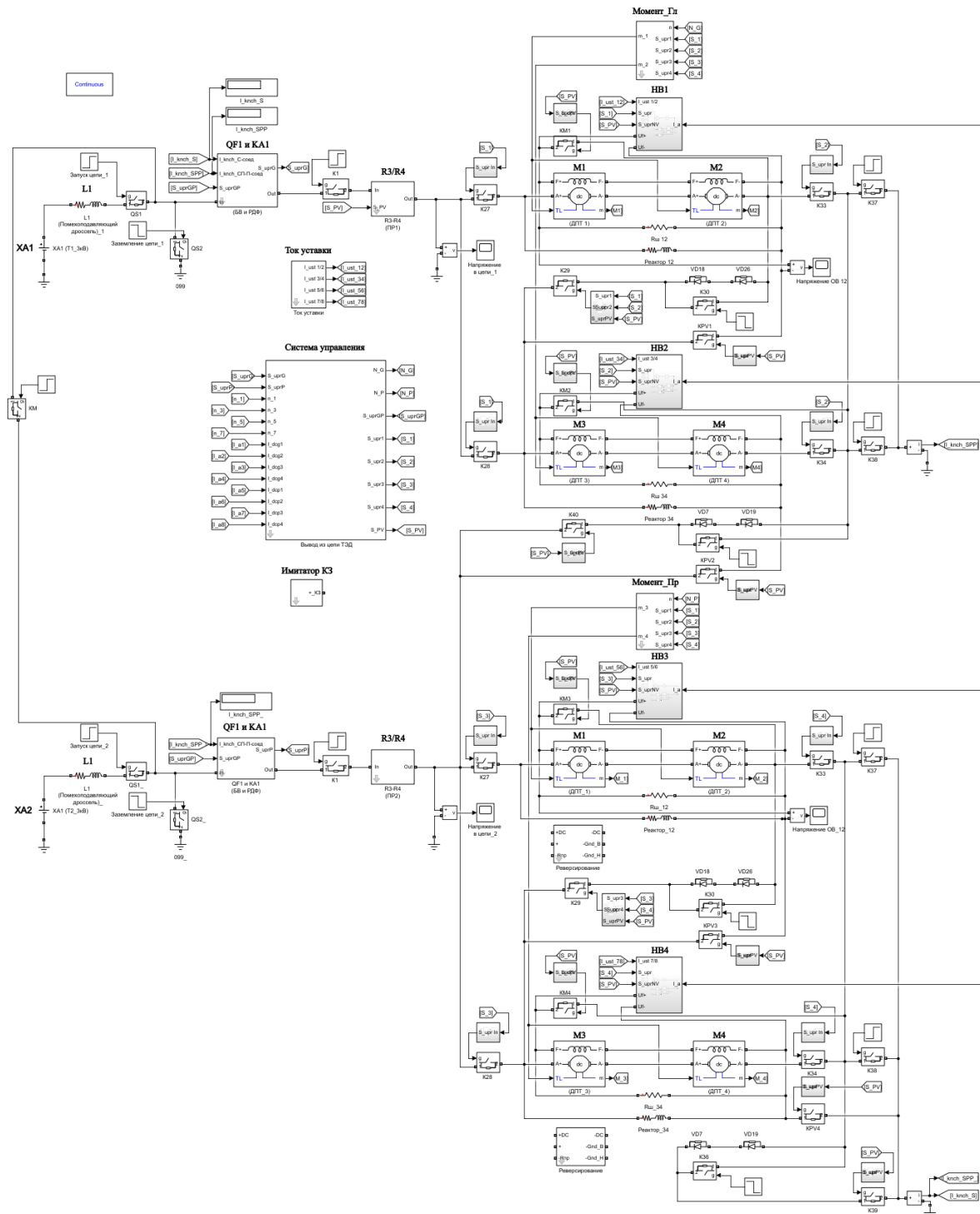


Рис. 2. Компьютерная цифровая модель электрической части электровоза 2ЭС6 для С-СП-П-соединения ТЭД

Модель пускового реостата реализована в виде подсистемы *R3-R4* и состоит из включенных последовательно резисторов *RLC Branch* и контакторов *Ideal Switch*. Момент сопротивления поступает на ТЭД от подсистемы «Момент_Гл/Пр», которая состоит из блоков *Matlab Function*, *Signal Builder* и *Constant*.

Для определения момента сопротивления на валу ТЭД (рис. 3) используются расчетная сила тяги, полученная от РПДА, и тяговый расчет. Среди параметров, которые подключены ко входам подсистемы «Вращающийся момент» и используются для тягового расчета, – блок построителя сигналов «Профиль пути» (уклоны) и обратная связь от тяговых электродвигателей в виде частоты вращения.

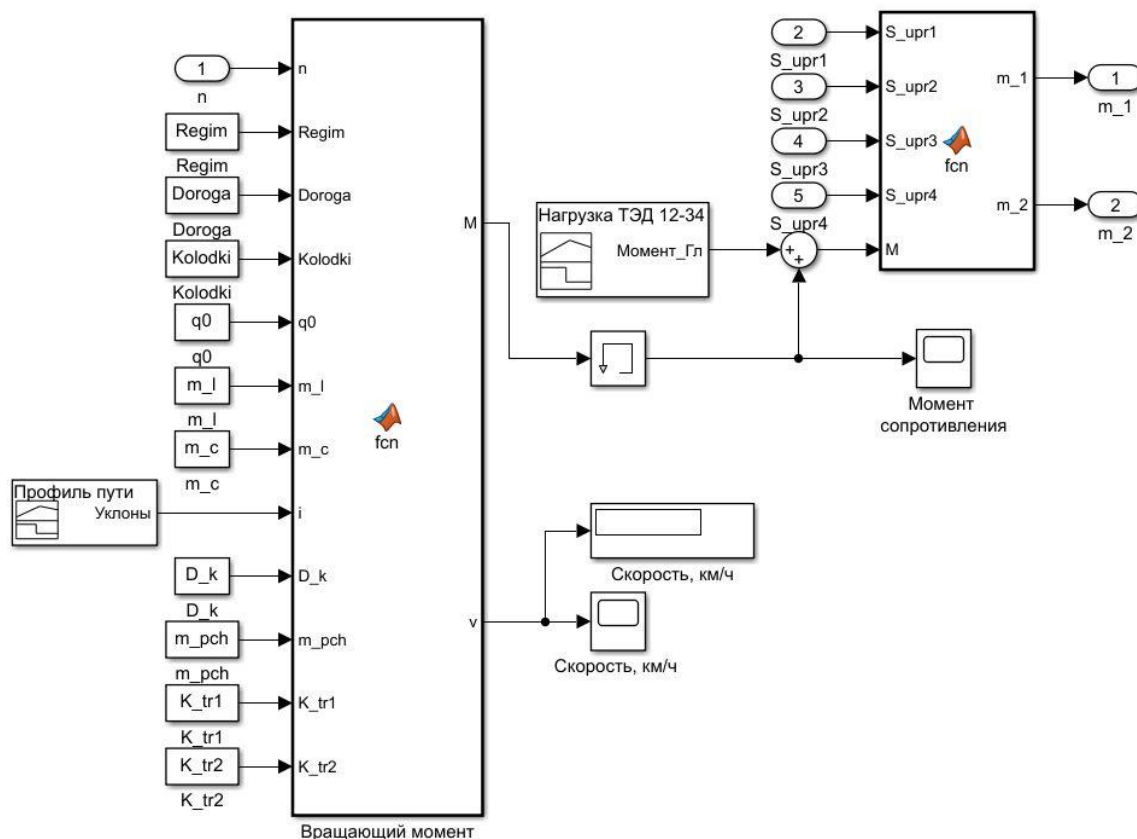


Рис. 3. Подсистема «Момент_Гл/Пр»

Питание обмоток возбуждения (ОВ) тяговых электродвигателей в разработанной цифровой компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6 осуществляется с помощью разработанной подсистемы «НВ 1/4» (рис. 4), где имеется блок функций *Matlab Function* с реализованным в нем законом для регулирования напряжения ОВ:

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в,уст}} + k \cdot I_{\text{я}},$$

где $I_{\text{в,уст}}$ – задаваемый ток уставки возбуждения; k – коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря; $I_{\text{я}}$ – ток в обмотках якоря ТЭД.

В разработанной подсистеме «НВ 1/4» имеется возможность для задания тока возбуждения на основе данных с бортовых измерительных систем электровоза.

Для компьютерного моделирования возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 разработаны коммутационные и защитные аппараты (быстродействующий выключатель ВАБ-55 и дифференциальное реле РДЗ-068 ЭТ), выполненные с помощью подсистем, блоков функций и различных измерительных блоков. При наличии аварийных режимов в электрической части электровоза происходит срабатывание быстродействующего выключателя (БВ) и дифференциального реле (РДФ) с помощью прописанных функций в подсистемах «БВ» и «РДФ» (рис. 5).

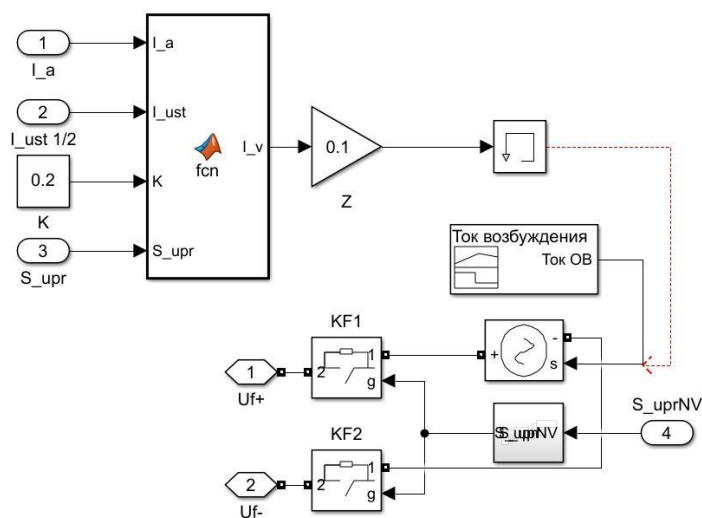


Рис. 4. Подсистема «НВ 1/4»

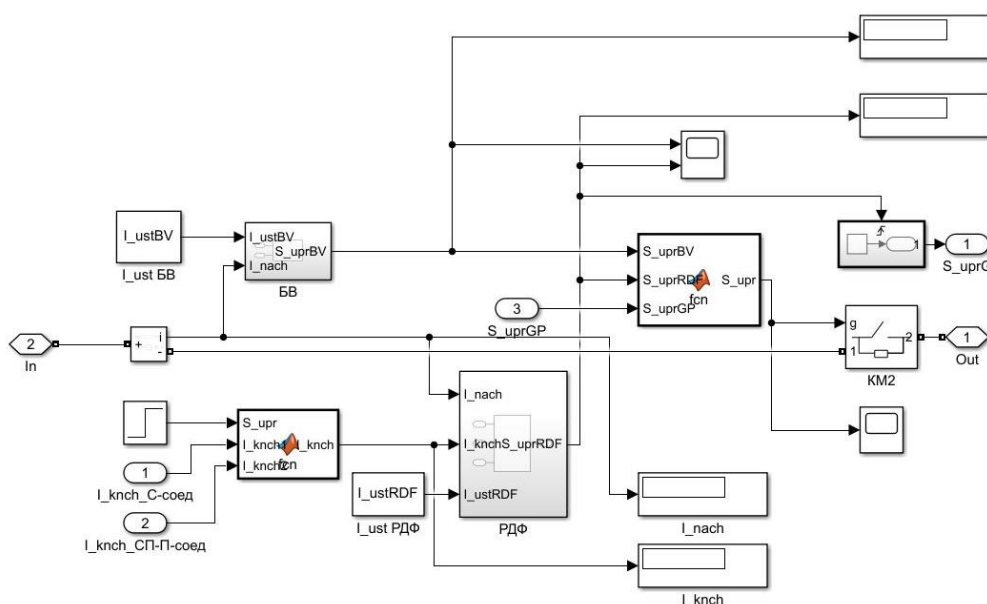


Рис. 5. Быстродействующий выключатель QF1 и дифференциальное реле KA1

Моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 с целью будущего генерирования набора данных для машинного обучения и поиска допустимых состояний

В качестве примера смоделированы некоторые из возможных неисправностей, среди которых короткое замыкание (КЗ) в разных частях электрической части электровоза 2ЭС6, а также пробой изоляции между коммутационными аппаратами.

1 При возникновении короткого замыкания в режиме тяги происходит отключение быстродействующего выключателя со срабатыванием дифференциального реле в одной из секций. Устранение неисправности в пути следования осуществляется путем вывода из электрической цепи неисправной пары тяговых электродвигателей. Для создания режима КЗ в электрических цепях разработан блок «Имитатор КЗ», который в данном случае подключен между ТЭД первой пары головной секции (М1 и М2). Вывод неисправных двигателей происходит с помощью блока «Система управления», по получении управляющих сигналов от БВ и РДФ выполняется проверка всех цепей тяговых электродвигателей, при обнаружении режима КЗ сигналы передаются на необходимые контакторы.

После выполнения запуска компьютерной модели на 25-й секунде с помощью блока «Имитатор КЗ» в цепи первой пары ТЭД происходит короткое замыкание. Срабатывают аппараты защиты БВ и РДФ, управляющий сигнал поступает на блок «Система управления», осуществляется автоматическая проверка всех цепей тяговых электродвигателей. Зафиксировав режим короткого замыкания, блок

«Система управления» передает соответствующие сигналы на контакторы К27-29 и К33-34 в головной секции электровоза, тем самым отключая неисправную пару ТЭД.

2 При включении быстродействующего выключателя происходит его отключение в одной из секций со срабатыванием дифференциального реле по причине пробоя изоляции провода 006 от $QF1$ и КА1 до контактора К1. Методом устранения такой неисправности в пути следования является отключение БВ и двигателей неисправной секции. Дальнейшая работа электровоза осуществляется на исправной секции с использованием всех видов соединений ТЭД.

После запуска компьютерной модели на 15-й секунде происходит короткое замыкание на проводе 006 в головной секции, срабатывает быстродействующий выключатель, управляющий сигнал передается на блок «Система управления», где фиксируются параметры ТЭД. После определения неисправной секции соответствующие сигналы поступают на контакторы К27-29, К33-34 и К40, двигатели неисправной секции выводятся из общей цепи, питание оставшейся секции осуществляется через второй источник питания ХА1.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты компьютерного моделирования при наличии и отсутствии режима короткого замыкания в цепях тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 представлены в виде зависимостей параметров от общего времени, которое в данном случае составило 65 секунд (рис. 6 и 7).

После срабатывания блока «Имитатор КЗ» первая пара ТЭД (М1 и М2) была отключена от питания (рис. 6, б). Кроме того, при выводе неисправной пары ТЭД также отключается соответствующий блок питания ОВ (рис. 6, в) электродвигателей (подсистема «НВ 1»).

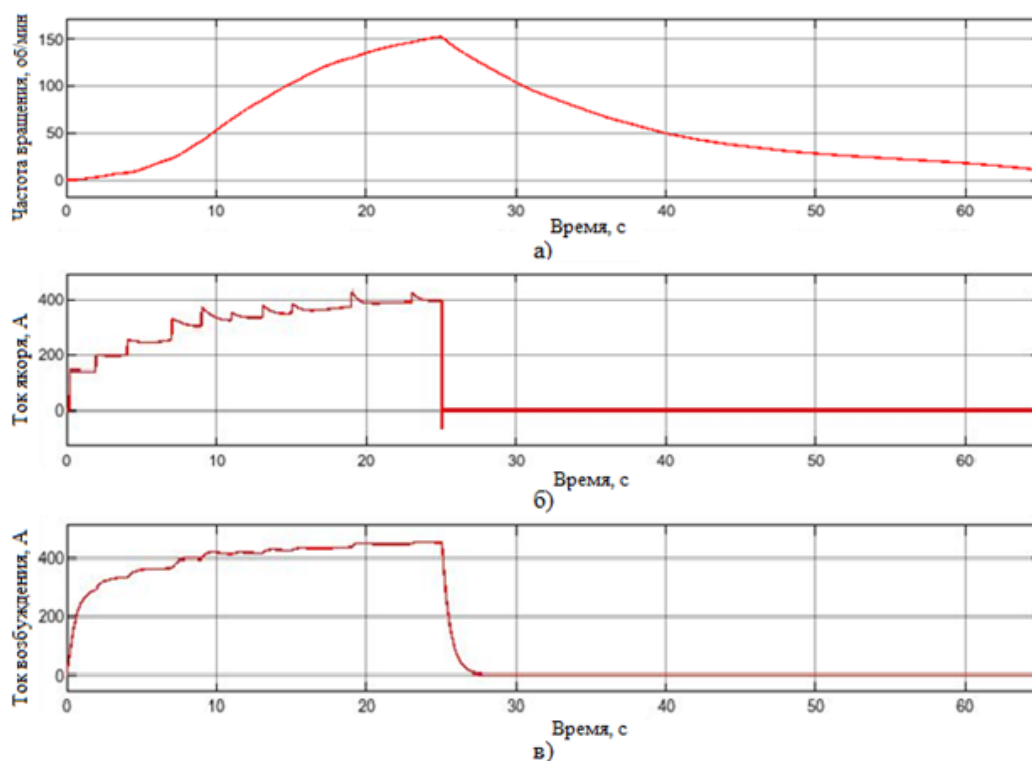


Рис. 6. Измеренные параметры первой пары ТЭД (М1 и М2) головной секции:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

На 25-й секунде компьютерного моделирования на четвертом двигателе второй пары ТЭД заметен бросок тока (рис. 7, б), связанный с возникновением режима КЗ в цепи первой пары двигателей головной секции.

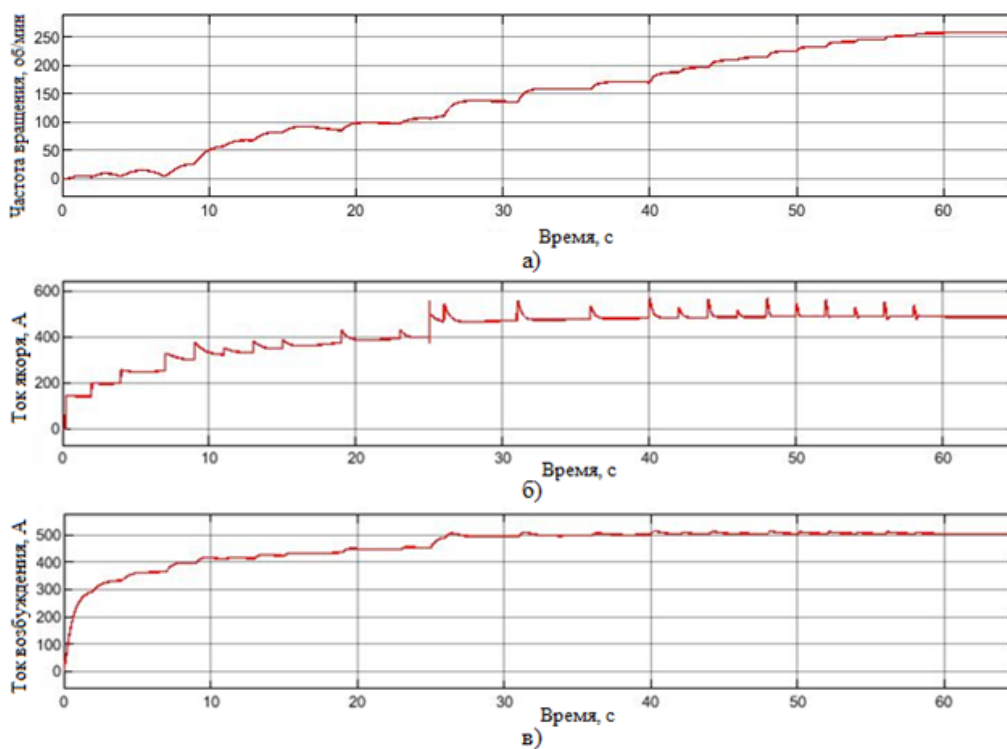


Рис. 7. Измеренные параметры второй пары ТЭД (М3 и М4) головной секции:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

Результаты моделирования при наличии и отсутствии пробоя изоляции провода 006 в электрической части электровоза 2ЭС6 представлены на рис. 8, 9.

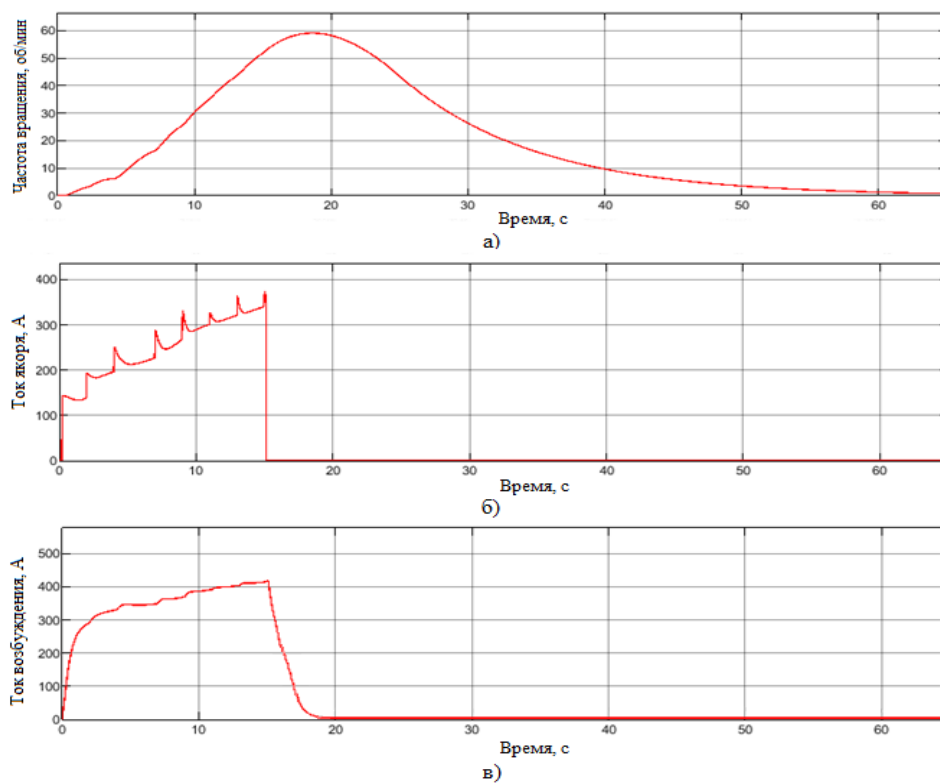


Рис. 8. Измеренные параметры первой пары ТЭД (М1 и М2) головной секции при наличии пробоя изоляции провода 006:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

После возникновения пробоя изоляции провода 006 между аппаратами защиты и контактором все тяговые электродвигатели и блоки подачи напряжения на ОВ в головной секции были отключены от питания (рис. 8, б и в).

На 15-й секунде после отключения БВ и вывода из цепи неисправной (головной) секции на оставшихся двигателях прицепной секции замечен бросок тока (рис. 9, б), связанный с наличием пробоя изоляции в головной секции электрической части электровоза 2ЭС6.

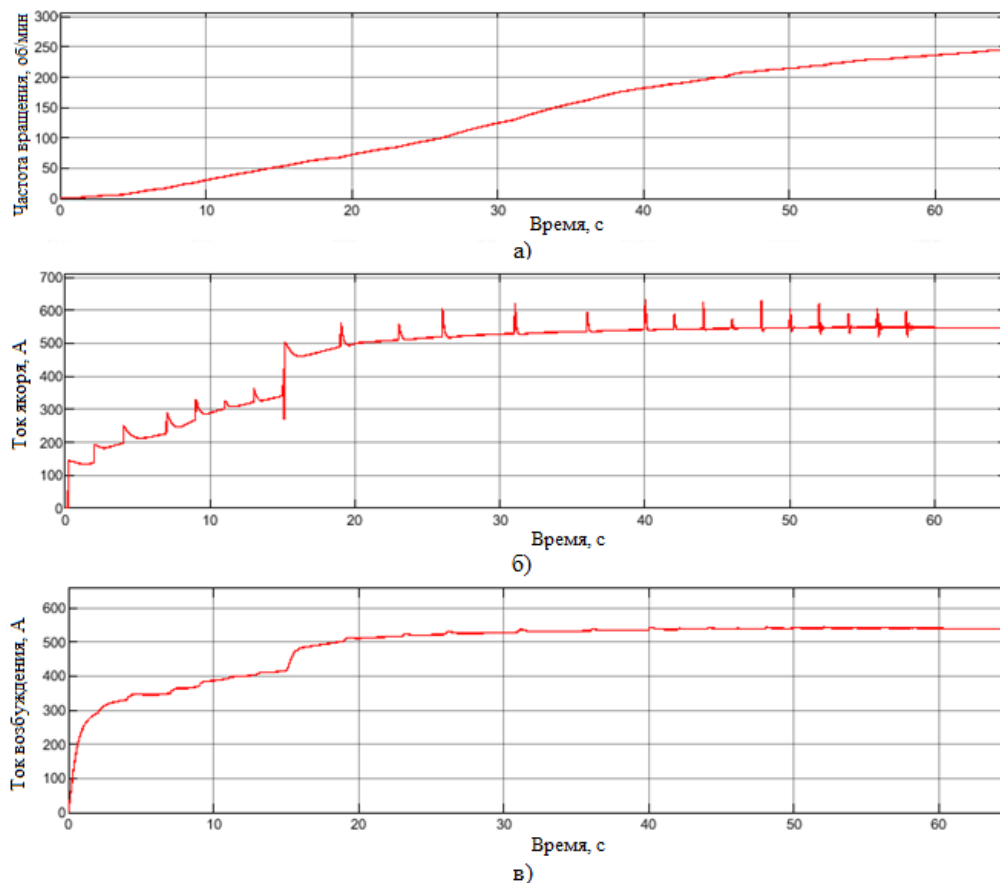


Рис. 9. Измеренные параметры первой пары ТЭД (М1 и М2) прицепной секции:

а – частота вращения; *б* – ток якоря; *в* – ток возбуждения

Полученные зависимости отражают изменение параметров в процессе движения электровоза, а также позволяют оценить заложенные алгоритмы работы в разработанных подсистемах и блоках, выполняющих функции защиты и управления.

Валидация разработанной компьютерной модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6 по данным РПДА

Валидация разработанной компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6 выполнена на основе данных, полученных с бортовых измерительных систем электроподвижного состава. Для оценки сходимости результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных в работе использовался коэффициент корреляции Пирсона.

На рис. 10 представлены зависимости рассчитанных и экспериментальных данных от общего времени моделирования (300 секунд), за этот период реализуются 23 позиции С-соединения ТЭД.

Коэффициент корреляции Пирсона для двух массивов данных (частота вращения) составил 0,992 ~99,2 %. Для тока якоря – 0,975 ~97,5 %, а для тока возбуждения – 0,997 ~99,7 %.

Анализ полученных результатов сравнения свидетельствует о достоверности разработанной компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6.

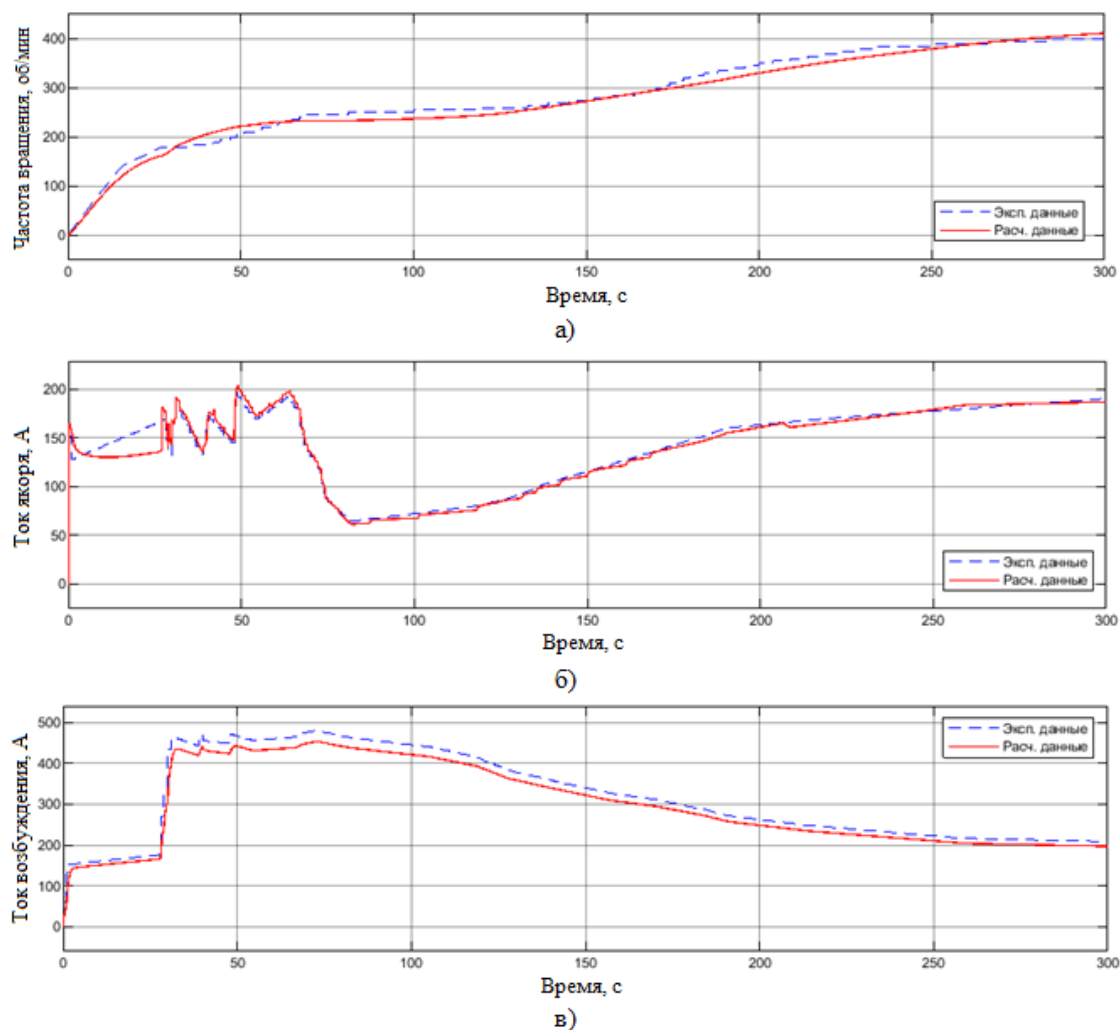


Рис. 10. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных данных:
а – частота вращения; б – ток якоря; в – ток возбуждения

Выводы

В результате проведенных исследований в *Matlab Simulink* создана компьютерная цифровая модель электрической части электровоза 2ЭС6 с использованием технологии цифрового двойника, с учетом данных бортовых измерительных систем в пути следования.

Выполнено компьютерное моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 с их последующим автоматизированным устранением. Представлены графики зависимостей частоты вращения, тока якоря и тока возбуждения от общего времени моделирования, что позволяет оценить заложенные алгоритмы работы в созданных подсистемах и блоках.

Валидация разработанной компьютерной цифровой модели электрической части электровоза 2ЭС6 выполнена с использованием ретроспективных данных, обработанных с реальных РПДА. Рассчитанный коэффициент корреляции Пирсона для всех массивов данных составил более 97 %, что свидетельствует о высокой степени адекватности модели и ее соответствии реальным параметрам работы электровоза.

Сформированный набор данных с различными параметрами движения электроподвижного состава, полученный с помощью технологии цифрового двойника, может быть использован для машинного обучения моделей прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития аварийных и предаварийных ситуаций. Кроме этого, такие данные также могут применяться для поиска допустимых состояний в пути следования в рамках прескриптивной аналитики, что и является предметом дальнейших исследований авторов.

Список литературы

1 Распоряжение ОАО «РЖД» от 19.08.2024 № 2009/р «Об утверждении паспорта Комплексной программы инновационного развития холдинга “РЖД” на период до 2025 года». – Текст : электронный // ОАО «РЖД» [сайт]. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9990/page/103290?id=19093> (дата обращения 23.01.2025).

2 Цифровая железная дорога – ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники / В. П. Куприяновский, В. В. Аленков, А. А. Климов [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 129–166. – DOI 10.25559/SITITO.2017.3.546.

3 **Третьяков, Е. А.** Обзор подходов к применению технологии «цифровой двойник» в эксплуатации и ремонте электроподвижного состава / Е. А. Третьяков, А. А. Будаев // Теория и практика современной науки : материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Южно-Сахалинск. – Новокузнецк : Знание-М, 2023. – С. 115–123. – ISBN 978-5-00187-719-6.

4 **Будаев, А. А.** К вопросу об автоматизации процессов диагностики технического состояния и эксплуатационных показателей электроподвижного состава на основе технологии «цифровой двойник» / А. А. Будаев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 94–99. – ISBN 978-5-94941-344-9.

5 Augmented digital twin for railway systems / E. Bernal, Q. Wu, M. Spiriyagin [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2023. – Vol. 62 (1). – P. 67–83. – DOI 10.1080/00423114.2023.2194543.

6 **Krmac, E.** Digital Twins for Railway Sector : Current State and Future Directions / E. Krmac, B. Djordjevic // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 108597–108615. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3439471.

7 Digitalization of railway transportation through AI-powered services : digital twin trains / S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanovic [et al.] // European Transport Research Review 16 (1). – 2024. – No. 58. – DOI 10.1186/s12544-024-00679-5.

8 **Alkharis, A.** Development of Smart Factory 4.0 using cyber-physical system-based workshop in Rolling Stock Industry to Support Industry 4.0 / A. Alkharis, R. Nadlifatin // Journal Eduvest. – 2024. – Vol. 4 (7). – P. 6146–6155. – DOI 10.59188/eduvest.v4i7.1547.

References

1 Order of JSC Russian Railways dated 19.08.2024 No. 2009/r “On approval of the passport of the Comprehensive program for innovative development of the Russian Railways holding company for the period up to 2025”. – Text : electronic // JSC Russian Railways [website]. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9990/page/103290?id=19093> (date of access: 01/23/2025).

2 Digital railway – ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins / V. P. Kupriyanovsky, V. V. Alenkov, A. A. Klimov [et al.] // Modern Information Technologies and IT Education. – 2017. – Vol. 13, No. 3. – P. 129–166. – DOI 10.25559/SITITO.2017.3.546.

3 **Tretyakov, E. A.** Review of approaches to the application of "digital twin" technology in the operation and repair of electric rolling stock / E. A. Tretyakov, A. A. Budaev // Theory and practice of modern science : proceedings of the III All-Russian (national) scientific and practical conference, Yuzhno-Sakhalinsk. – Novokuznetsk : Znanie-M, 2023. – P. 115–123. – ISBN 978-5-00187-719-6.

4 **Budaev, A. A.** On the issue of automation of diagnostic processes of the technical condition and operational indicators of electric rolling stock based on the “digital twin” technology / A. A. Budaev // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. – Omsk : Omsk State Transport University, 2024. – P. 94–99. – ISBN 978-5-94941-344-9.

5 Augmented digital twin for railway systems / E. Bernal, Q. Wu, M. Spiriyagin [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2023. – Vol. 62 (1). – P. 67–83. – DOI 10.1080/00423114.2023.2194543.

6 **Krmac, E.** Digital Twins for Railway Sector : Current State and Future Directions / E. Krmac, B. Djordjevic // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 108597–108615. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3439471.

7 Digitalization of railway transportation through AI-powered services : digital twin trains / S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanovic [et al.] // European Transport Research Review 16(1). – 2024. – No. 58. – DOI 10.1186/s12544-024-00679-5.

8 **Alkharis, A.** Development of Smart Factory 4.0 using cyber-physical system-based workshop in Rolling Stock Industry to Support Industry 4.0 / A. Alkharis, R. Nadlifatin // Journal Eduvest. – 2024. – Vol. 4 (7). – P. 6146–6155. – DOI 10.59188/eduvest.v4i7.1547.

9 **Шевченко, Д. В.** Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д. В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 2. – С. 91–99. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

10 **Обухов, А. Д.** Организация предиктивного технического обслуживания локомотивов / А. Д. Обухов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 86–88. – ISSN 1818-5509.

11 **Ларченко, Е. А.** Цифровая трансформация производственной системы управления в локомотиворемонтном комплексе ОАО «РЖД» / Е. А. Ларченко, А. С. Дубинина, А. А. Еременко // Российская экономика в условиях структурной трансформации : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк / под общей редакцией Д. Н. Ганченко, О. А. Цвиркун. – Москва : ООО «Актуальность.РФ», 2023. – С. 131–139. – ISBN 978-5-605-02404-0.

12 **Никонова, Я. И.** Цифровые двойники на железнодорожном транспорте : преимущества и проблемы внедрения / Я. И. Никонова // Муниципальная академия. – 2024. – № 1. – С. 124–133. – DOI 10.52176/2304831X_2024_01_124.

13 **Тарута, В. Ф.** Использование технологии «цифровой двойник» тепловоза при проведении автоматизированных реостатных испытаний / В. Ф. Тарута, Л. В. Милютина, М. В. Глухова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 148–153. – ISBN 978-5-94941-272-5.

14 **Тарута, В. Ф.** Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта тепловозов с использованием цифровых двойников / В. Ф. Тарута, Л. В. Милютина, М. В. Глухова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы XVI научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 462–468. – ISBN 978-5-94941-297-8.

15 **Надобных, М. О.** Цифровой двойник силовой цепи электровоза 2ЭС6 в режиме тяги / М. О. Надобных, Д. А. Бережнов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава (Ремонт и Динамика'23) : материалы VI Всероссийской научно-технической конференции

9 **Shevchenko, D. V.** Methodology for constructing digital twins in railway transport / D. V. Shevchenko // Russian Railway Science Journal. – 2021. – Vol. 80, No. 2. – P. 91–99. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

10 **Obukhov, A. D.** Organization of predictive maintenance of locomotives / A. D. Obukhov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (53). – P. 86–88. – ISSN 1818-5509.

11 **Larchenko, E. A.** Digital transformation of the production management system in the locomotive repair complex of JSC Russian Railways / E. A. Larchenko, A. S. Dubinina, A. A. Eremenko // Russian economy in conditions of structural transformation : collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference, Novokuznetsk / edited by D. N. Ganchenko, O. A. Tsvirkun. – Moscow : LLC “Aktualnost.RF”, 2023. – P. 131–139. – ISBN 978-5-605-02404-0.

12 **Nikonova, Ya. I.** Digital twins in railway transport : advantages and problems of implementation / Ya. I. Nikonova // Municipal Academy. – 2024. – No. 1. – P. 124–133. – DOI 10.52176/2304831X_2024_01_124.

13 **Taruta, V. F.** Using the “digital twin” technology of a diesel locomotive when conducting automated rheostat tests / V. F. Taruta, L. V. Milyutina, M. V. Glukhova // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : materials of a scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. – Omsk : Omsk State Transport University, 2021. – P. 148–153. – ISBN 978-5-94941-272-5.

14 **Taruta, V. F.** Improving the system of maintenance and repair of diesel locomotives using digital twins / V. F. Taruta, L. V. Milyutina, M. V. Glukhova // Innovative projects and technologies in education, industry and transport : proceedings of the XVI scientific conference dedicated to the Day of Russian Science. – Omsk : Omsk State Transport University, 2022. – P. 462–468. – ISBN 978-5-94941-297-8.

15 **Nadobnykh, M. O.** Digital twin of the power circuit of the 2ES6 electric locomotive in traction mode / M. O. Nadobnykh, D. A. Berezhnov // Technological support for repair and improvement of the dynamic qualities of railway rolling stock (Repair and Dynamics'23) : proceedings of the VI All-Russian scientific and technical conference with international participation. – Omsk :

с международным участием. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 238–244. – ISBN 978-5-94941-334-0.

16 **Будаев, А. А.** Принципы построения имитационных моделей электровозов по технологии «цифровой двойник» / А. А. Будаев, А. Н. Соловьев // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 39–43. – ISBN 978-5-94614-569-5.

Omsk State Transport University, 2023. – P. 238–244. – ISBN 978-5-94941-334-0.

16 **Budaev, A. A.** Principles of constructing simulation models of electric locomotives using “digital twin” technology / A. A. Budaev, A. N. Solovyov // Research and development of rail and automobile transport : collection of materials of the International scientific and practical conference. – Ekaterinburg : Ural State University of Railway Transport, 2024. – P. 39–43. – ISBN 978-5-94614-569-5.

A. A. Budaev, E. A. Tretyakov

COMPUTER MODELING OF POSSIBLE MALFUNCTIONS IN THE ELECTRIC PART OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE ON THE BASIS OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Abstract. The results of computer modeling of possible faults in the electrical part of an electric locomotive based on the digital twin technology using Matlab Simulink software are presented. For approbation of the developed digital twin of the electric part of the 2ES6 electric locomotive the validation of the computer model on the basis of retrospective data measured with the help of the onboard recorder of motion parameters and autotracking (RMPA) was carried out. The results of the research can be used for machine learning of the model for predicting of the state of electric rolling stock, namely for the purpose of generating a set of data with different parameters of electric locomotive motion due to the small number of records of real trips with RMPA. Prospects of practical application of the obtained results are related to the developed system of prescriptive monitoring and diagnostics for automatic prevention of electric locomotive faults on the way.

Keywords: digital twin, electric rolling stock, simulation model, prediction, modeling, machine learning.

For citation: Budaev, A. A. Computer modeling of possible malfunctions in the electric part of an electric locomotive on the basis of digital twin technology / A. A. Budaev, E. A. Tretyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 121–132. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_121.

Сведения об авторах

Будаев Артём Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», аспирант,
e-mail: artem.bydaev2@yandex.ru

Третьяков Евгений Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», доктор технических наук, доцент,
e-mail: eugentr@mail.ru

Information about the authors

Budaev Artyom Anatolyevich

Omsk State Transport University (OSTU), Chair “Rolling Stock of Electric Railways”, Postgraduate Student,
e-mail: artem.bydaev2@yandex.ru

Tretyakov Evgeny Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU), Chair “Rolling Stock of Electric Railways”, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: eugentr@mail.ru