

УДК 629.423

Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник»

А. А. Будаев, Е. А. Третьяков

Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 644046, Омск, Маркса пр., 35

Для цитирования: Будаев А. А., Третьяков Е. А. Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 92–101. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-92-101

Аннотация

Цель: Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» для прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) по данным измерительных систем в пути следования, поиска допустимых состояний в реальном времени на основе моделирования в рамках прескриптивной аналитики. **Методы:** Для решения поставленных задач использовались методы имитационного компьютерного моделирования в среде Matlab Simulink, программирования на языке C#, математической статистики и теории электрической тяги. **Результаты:** Разработана имитационная цифровая модель электрической части грузового электровоза в Matlab Simulink на основе технологии «Цифровой двойник» с учетом данных бортовых измерительных систем в пути следования. Выполнена валидация разработанной имитационной модели электрической части электровоза 2ЭС6 на основе ретроспективных данных, полученных после обработки записей РПДА. Выполнено имитационное моделирование возможной неисправности в электрической части электровоза 2ЭС6 с ее последующим автоматизированным устранением, представлены графики полученных рассчитанных и экспериментальных зависимостей по времени. **Практическая значимость:** Полученные результаты исследования, а именно разработанные имитационные модели электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» могут найти применение с целью генерирования набора данных с различными параметрами движения поезда для машинного обучения модели прогнозирования состояния электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) в рамках разрабатываемой прескриптивной системы автоматического предотвращения неисправностей электроподвижного состава в пути следования.

Ключевые слова: Цифровой двойник, электроподвижной состав, имитационная модель, неисправности, машинное обучение.

Введение

Актуальность создания и применения цифровых двойников на электроподвижном составе подтверждается Паспортом комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 06.09.2023 № 2274/р).

Вопросами внедрения и применения «цифровых двойников» в производстве и ремонте электроподвижного состава (ЭПС) занимались как

отечественные, так и зарубежные исследователи. В работах Ф. Пайрс, А. Эль Саддик, И. Эрандо-неа, Л. Де Донато и др. [1–4] представлены структурные схемы и информационные связи между отдельными элементами подсистем, раскрывающих суть технологии «Цифровой двойник», а также приведены примеры реализации для тормозного оборудования электровозов. В публикациях И. К. Лакина, А. П. Семенова, А. А. Аболмасова, А. С. Ададунова [5–9] представлены результаты

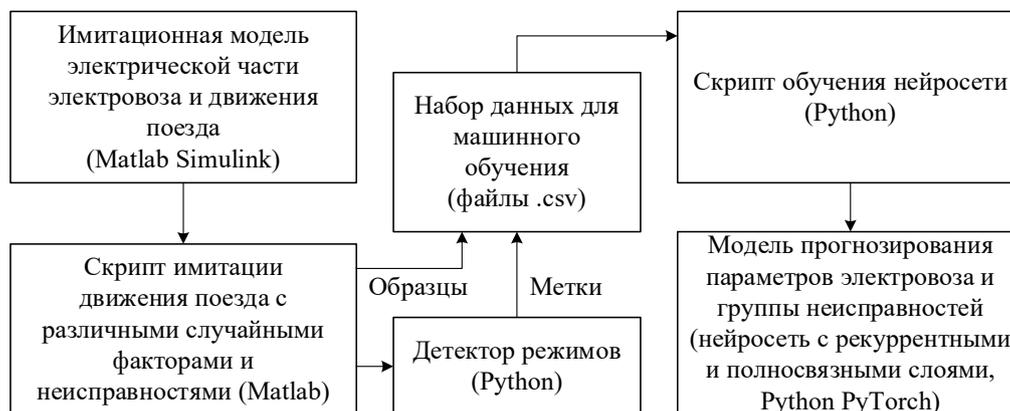


Рис. 1. Структурная схема обучающего модуля

исследований, согласно которым технология «Цифровой двойник» развивается применительно к предиктивной технической диагностике состояния ЭПС для технического обслуживания и текущего ремонта по состоянию с учетом информации с бортовых измерительных систем и статистики ремонта на протяжении всего жизненного цикла. В основе проекта «Умный локомотив» [8, 11–12] находится цифровая модель, которая позволяет проводить мониторинг и прогнозировать техническое состояние некоторых узлов ЭПС.

Анализ опубликованных работ свидетельствует о том, что на данный момент в недостаточной степени рассматриваются вопросы применения технологии «Цифровой двойник» для прогнозирования (моделирования) параметров ЭПС и сценариев развития ситуаций по данным измерительных систем (ретроспективных и текущих) в пути следования.

Целью данного исследования является моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» для прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) в рамках прескриптивной аналитики.

Основные задачи:

- разработка имитационной цифровой модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6 на основе технологии «Цифровой двойник»;

- валидация разработанной имитационной цифровой модели на основе ретроспективных данных, полученных после обработки записей с бортового регистратора параметров движения;

- моделирование возможных неисправностей и параметров движения электровоза с целью последующего формирования набора данных для машинного обучения и поиска допустимых параметров (состояний).

Материалы и методы

В основе цифровой имитационной модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6 используются данные с бортового регистратора параметров движения и автоведения (РПДА). Ввиду ограниченного количества файлов РПДА электровозов с неисправностями и различными параметрами движения поезда из реальных поездов необходимым является формирование данных для машинного обучения с помощью разработанной имитационной модели.

Взаимосвязь технологии «Цифровой двойник» электрической части электровоза 2ЭС6 и методов машинного обучения в контексте решаемых задач представлена в виде структурной схемы обучающего модуля (рис. 1).

Данная схема состоит из цифровой имитационной модели электрической части электровоза и движения поезда, а также скрипта, кото-

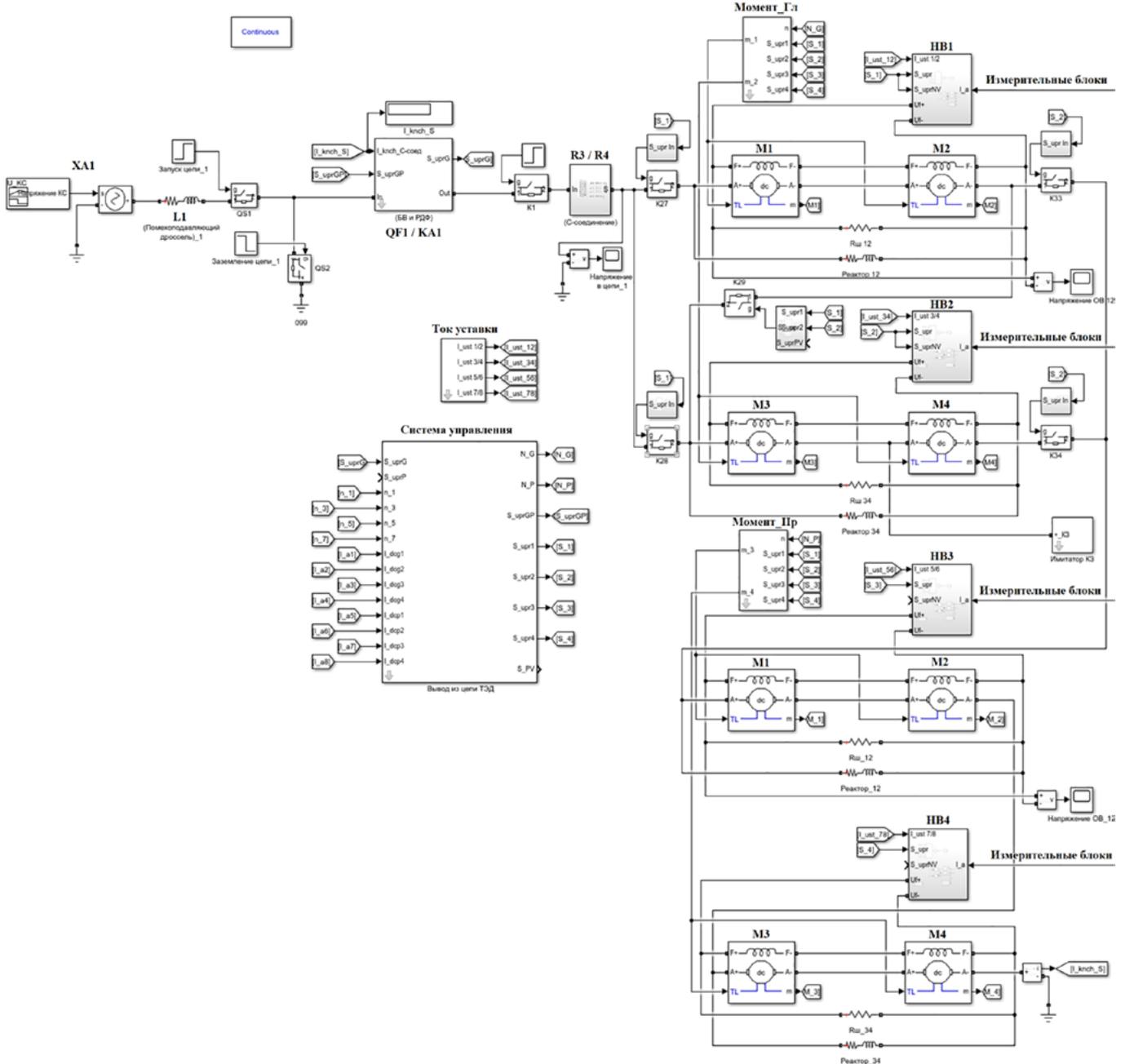


Рис. 2. Имитационная модель электрической части электровоза 2ЭС6

рый осуществляет запуск модели с различными параметрами. Скрипт осуществляет генерацию необходимого количества файлов с записями имитированных поездок в виде зависимостей параметров движения электровоза от общего времени моделирования. Каждый файл помечается меткой (наличие или отсутствие неисправности,

недопустимых состояний), которая определяется с помощью детектора режимов.

В результате машинного обучения формируется модель прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) по данным измерительных систем в пути следования, поиска допустимых состояний

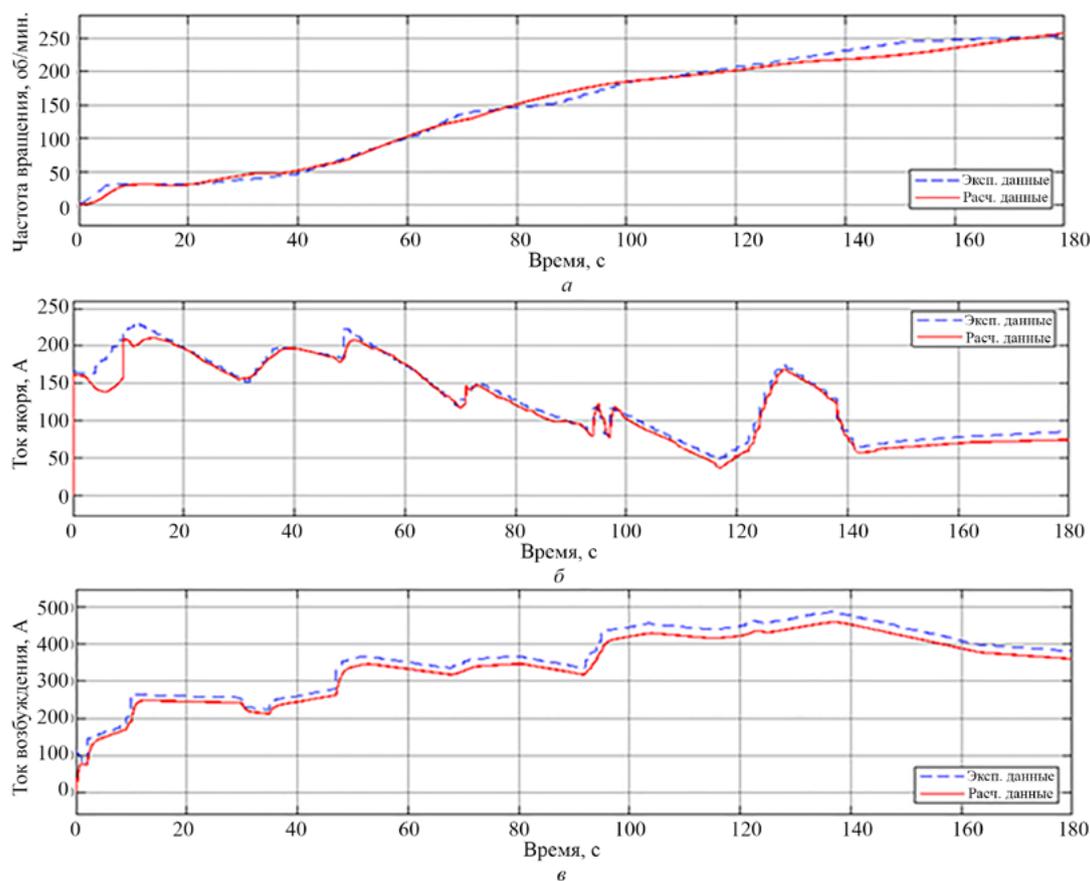


Рис. 3. Параметры ТЭД «М2» (ДПТ2):

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

в реальном времени на основе моделирования в рамках прескриптивной аналитики.

Разработка имитационной цифровой модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6

Имитационная цифровая модель силовой электрической части электровоза 2ЭС6 реализована в программе Matlab Simulink [13]. В качестве исходных данных используются технические характеристики тягового электродвигателя (ТЭД) ЭДП 810, параметров пусковых, шунтирующих сопротивлений силовой цепи, токов уставок коммутационного оборудования, массивы дискретных данных по времени с бортовых систем РПДА (напряжение на токоприемнике, токи возбуждения ТЭД, позиции переключения пускового реостата, сила тяги).

Имитационная цифровая модель силовой электрической части электровоза 2ЭС6 в программе Matlab Simulink для С-соединения ТЭД представлена на рис. 2.

Пусковой реостат в разработанной модели выполнен в виде подсистемы *R3-R4*, где последовательно соединены резисторы и переключатели. Момент сопротивления на валу ТЭД рассчитывается в подсистеме «Момент_Гл/Пр» на основе расчетной силы тяги, получаемой с РПДА, и тягового расчета. Независимое возбуждение в разработанной модели реализовано в виде подсистемы с обратной связью по току якоря. В подсистеме имеется блок *Matlab Function*, где реализуется следующий закон для регулирования напряжения обмотки возбуждения (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.

Предусмотрена возможность задания тока возбуждения на основе данных с РПДА.

Для имитационного моделирования возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 реализованы с помощью нескольких подсистем и блоков функций *Matlab Function*, а также измерительных блоков коммутационные и защитные аппараты: быстродействующий выключатель ВАБ-55 и дифференциальное реле РДЗ-068 ЭТ. В подсистемах «БВ» и «РДФ» прописаны функции, на основе которых происходит срабатывание быстродействующего выключателя (БВ) и дифференциального реле (РДФ) при наличии аварийных режимов.

Валидация разработанной имитационной модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6

Валидация разработанной имитационной модели выполнена на основе данных, полученных с РПДА электровоза. В качестве критерия сходимости результатов имитационного моделирования и экспериментальных данных принят коэффициент корреляции Пирсона.

На рис. 3 представлено сравнение результатов имитационного моделирования частоты вращения, токов якоря, возбуждения и измеренных данных РПДА электровоза 2ЭС6 в пути следования на 23 позиции С-соединения ТЭД во временном отрезке 180 с.

Коэффициент корреляции Пирсона между расчетными и экспериментальными данными составил: частота вращения — 99,65 %, ток якоря — 98,54 % и ток возбуждения — 99,61 %.

Анализ сравнения результатов имитационного моделирования и измеренных данных РПДА электровоза 2ЭС6 в пути следования свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Моделирование возможных неисправностей и параметров движения поезда в электрической части электровоза 2ЭС6

Рассмотрим результаты имитационного моделирования короткого замыкания в цепях тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 как пример последствий одной из неисправностей в пути следования. В результате описанной неисправности в режиме тяги отключается быстродействующий выключатель со срабатыванием дифференциального реле в секции. Для устранения неисправности в пути следования из силовой электрической цепи выводится неисправная пара ТЭД. Имитация короткого замыкания в электрических цепях, например между ТЭД второй пары головной секции (М3 и М4), выполнена с помощью разработанного блока «Имитатор КЗ». Для вывода из цепи пары ТЭД разработан блок «Вывод из цепи ТЭД». При наличии определенных сигналов от БВ и РДФ в данной подсистеме проводится проверка цепей тяговых электродвигателей, после чего передаются управляющие сигналы на соответствующие контакторы.

После запуска имитационной модели на 65-й секунде происходит короткое замыкание в цепи тяговых электродвигателей. Сигнал о срабатывании быстродействующего выключателя и дифференциального реле *QF1* и *KA1* передается в подсистему «Вывод из цепи ТЭД», где начинается проверка цепей всех ТЭД. При обнаружении короткого замыкания в блоке «Вывод из цепи ТЭД» формируются управляющие сигналы, которые поступают на контакторы «К27-29» и «К33-34» в головной секции электровоза, обеспечивая отключение пары ТЭД (М3 и М4).

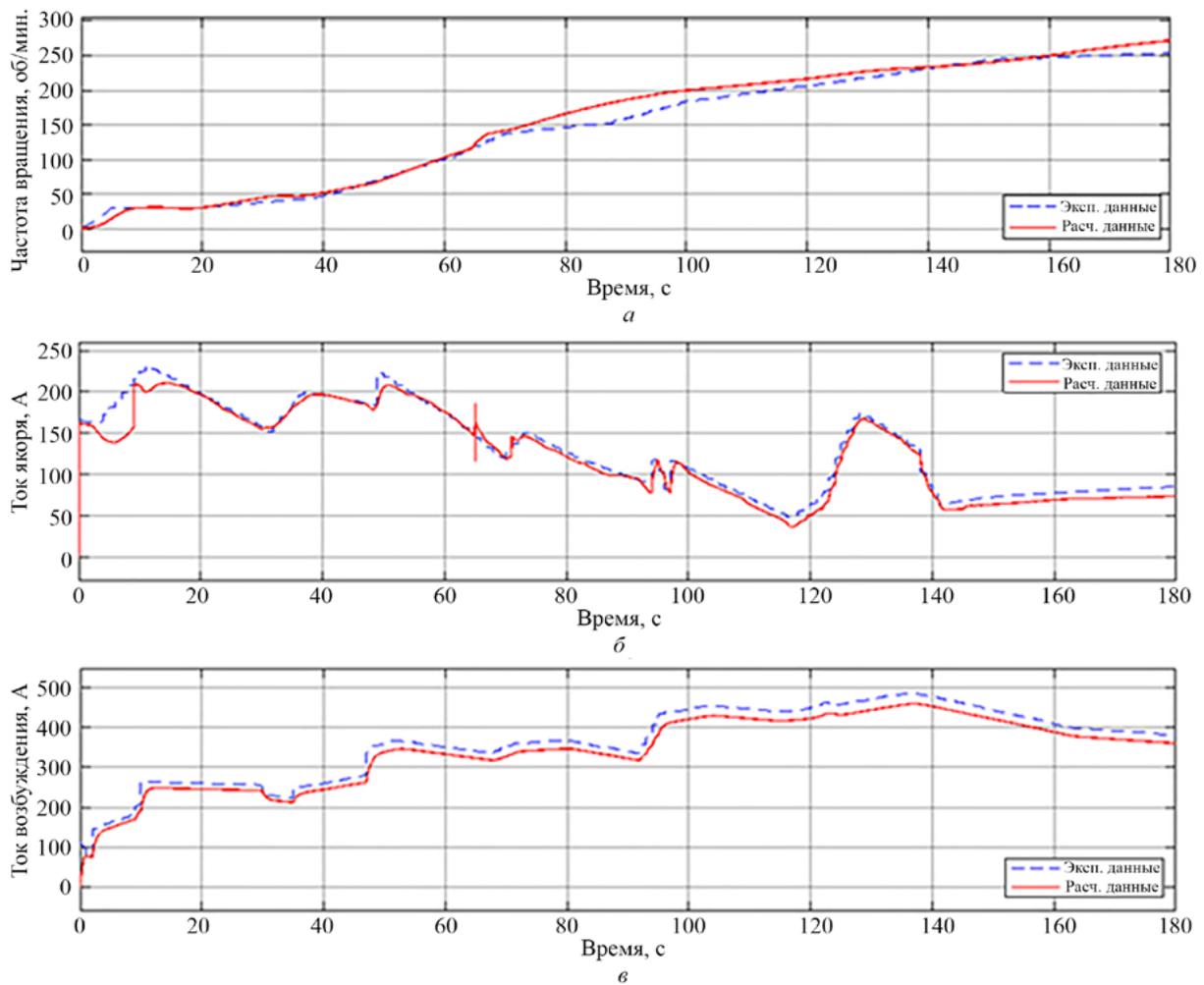


Рис. 4. Параметры исправной пары ТЭД «M1 — M2»:
 а — частота вращения; б — ток якоря; в — ток возбуждения

Результаты и обсуждение

Результаты имитационного моделирования силовой цепи электровоза 2ЭС6 в пути следования при отсутствии и наличии короткого замыкания представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

На 65-й секунде имитационного моделирования на втором двигателе первой пары ТЭД наблюдается бросок тока (рис. 4), обусловленный появлением КЗ в цепи другого ТЭД. После срабатывания блока «Имитатор КЗ» ТЭД M4 отключен от питания (рис. 5). При выводе из цепи пары ТЭД также отключается соответствующий канал статического преобразователя СТПР1000 (в данном случае блок «НВ 2»).

Выводы

В результате проведенных исследований разработана имитационная цифровая модель электрической части грузового электровоза в Matlab Simulink на основе технологии «Цифровой двойник» с учетом данных бортовых измерительных систем в пути следования. Выполнена валидация разработанной имитационной модели электрической части электровоза 2ЭС6 на основе ретроспективных данных, полученных после обработки записей РПДА. Коэффициент корреляции Пирсона для всех рассчитанных данных составил более 98 %, что говорит об адекватности модели и ее соответствии реальным параметрам работы электро-

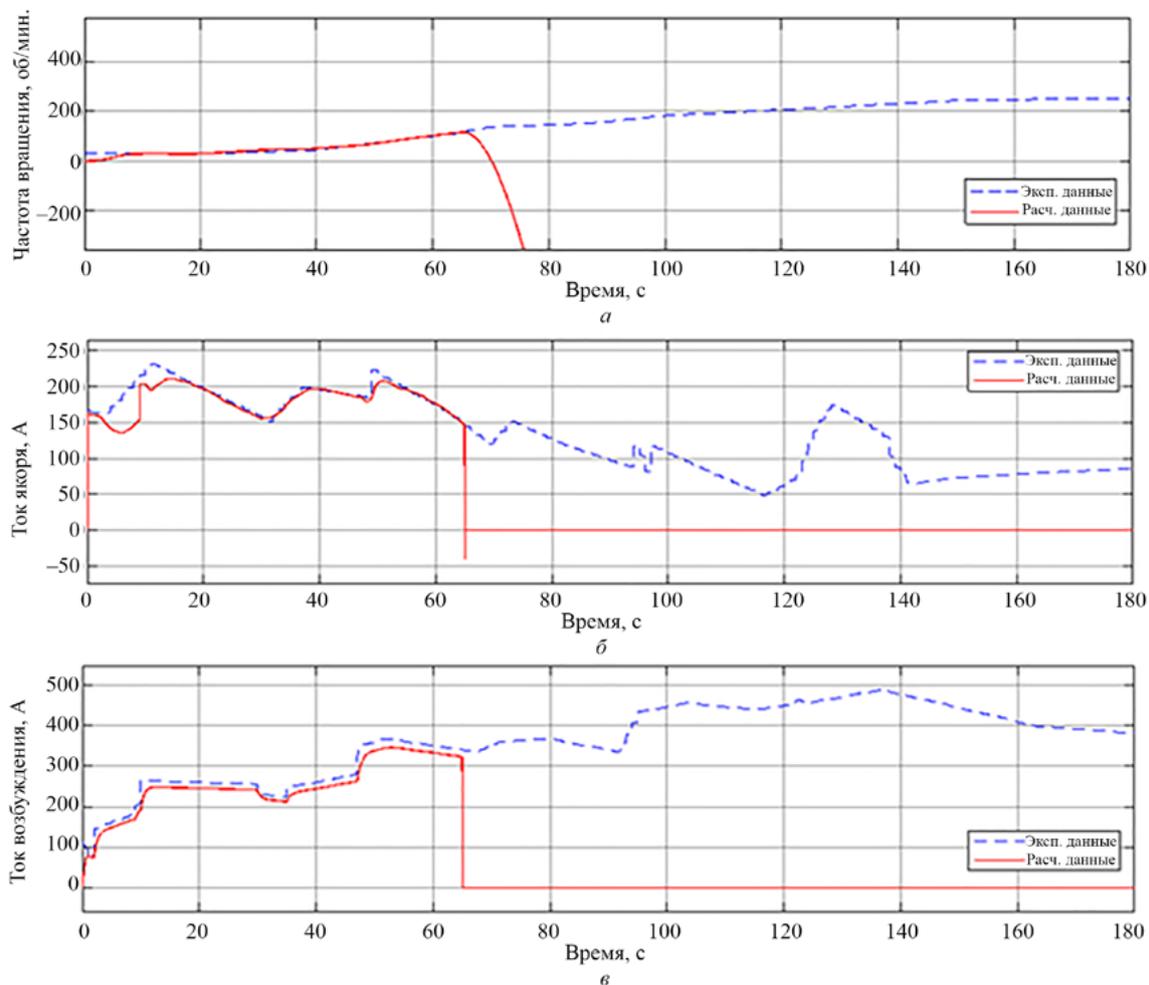


Рис. 5. Параметры неисправной пары ТЭД «М3 — М4»:
 а — частота вращения; б — ток якоря; в — ток возбуждения

воза. Выполнено имитационное моделирование возможной неисправности в электрической части электровоза 2ЭС6 с ее последующим автоматизированным устранением, представлены графики полученных рассчитанных и экспериментальных зависимостей по времени. Сгенерированный набор данных с различными параметрами движения поезда, полученных с помощью представленного имитационного моделирования на основе технологии «Цифровой двойник», может использоваться для машинного обучения модели прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные), поиска допустимых состояний в пути следования в рам-

ках прескриптивной аналитики, что и является предметом дальнейших исследований авторов.

Список источников

1. Pires F. Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges / F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa et al. // IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). — Helsinki, Finland, 2019. — Pp. 721–726. — DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972134.
2. Errandonea I. Digital twin for maintenance: A literature review / I. Errandonea, S. Beltrán, S. Arrizabalaga // Computers in Industry. — 2020. — Iss. 123. — DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.

3. Ghaboura S. Digital Twin for Rail-way: A Comprehensive Survey / S. Ghaboura, R. Ferdousi, F. Laamarti et al. // IEEE Access. — 2023. — Iss. 11. — Pp. 120237–120257. — DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042.
4. Donato L. Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture / L. De Donato, R. Dirnfeld, A. Somma et. al. // Journal of Reliable Intelligent Environments. — 2023. — Iss. 9. — Pp. 303–317. DOI: 10.1007/s40860-023-00208-6.
5. Лакин И. К. Использование технологии «Цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов / И. К. Лакин, А. П. Семенов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 89–98. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89–98.
6. Ададунов А. С. Общие принципы построения предиктивной системы диагностики нового электропоезда ЭС2Г «Ласточка» и первые экспериментальные данные / А. С. Ададунов, В. И. Федорова, А. М. Бойко // Национальная Ассоциация Ученых. — 2022. — № 75-2. — С. 14–22.
7. Ададунов А. С. Аппаратно-программный комплекс прескриптивной системы диагностики для электропоезда «Ласточка» / А. С. Ададунов, В. И. Федорова, А. А. Перевязкин // Автоматика, связь, информатика. — 2023. — № 2. — С. 16–19.
8. Аболмасов А. А. Совершенствование методов диагностирования электрических машин локомотивов по данным микропроцессорных систем управления / А. А. Аболмасов, Д. О. Лисин, В. А. Мельников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 69–75. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75.
9. Хабаров Р. А. Предиктивная диагностика технического состояния деталей, агрегатов и систем подвижного состава / Р. А. Хабаров, М. М. Раевский // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2022. — С. 217–227.
10. Репешко Н. А. Принципы работы «Умного локомотива» / Н. А. Репешко // Транспорт: наука, образование, производство: сборник трудов Международной научно-практической конференции. — Ростов-на-Дону: Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2018. — Т. 2. — С. 171–174.
11. Иванков Д. О. Принципы работы «Умного локомотива» / Д. О. Иванков, А. А. Понятов // Техника и технологии наземного транспорта: материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции. — Нижний Новгород: Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский гос. ун-т путей сообщения» в г. Нижнем Новгороде, 2022. — С. 282–287.
12. 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 гос. ун-т путей сообщения, 2024. — С. 94–99.
13. Будаев А. А. Принципы построения имитационных моделей электропоездов 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.

Дата поступления: 09.12.2024

Решение о публикации: 31.01.2025

Контактная информация:

БУДАЕВ Артем Анатольевич — аспирант;
artem.bydaev2@yandex.ru

ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович — д-р техн.
наук, доц.; eugentr@mail.ru

A “Digital Twin”-Based Simulation Model for an Electric Locomotive Electrical Equipment

A. A. Budaev, E. A. Tretyakov

Omsk State Transport University, Russian Federation, 35, Marks pr., Omsk, 644046, Russian Federation

For citation: Budaev A. A., Tretyakov E. A. A “Digital Twin”-Based Simulation Model for an Electric Locomotive Electrical Equipment // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 92–101. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-92-101

Summary

Purpose: To develop a “Digital Twin”-based simulation model for an electric locomotive electrical part for predicting electric locomotive parameters and scenarios (including emergencies) based on en route measurement system data, as well as to define model-based real-time valid parameters within a prescriptive analytics framework. **Methods:** Methods of computer simulation modeling in Matlab Simulink environment, C# programming, mathematical statistics and electric traction theory were used to solve the set tasks. **Results:** The simulation digital model of an electric freight locomotive electrical part in Matlab Simulink based on “Digital Twin” technology has been developed using the on-board measurement system data en route. Validation of the developed simulation model of the 2ES6 electric locomotive electrical part based on retrospective data obtained from processing the RPDA records has been carried out. Fault simulation in the electrical part of the 2ES6 electric locomotive with subsequent fault elimination has been performed, with graphs of calculated and experimental time dependencies obtained and presented. **Practical significance:** The research results obtained, namely the “Digital Twin”-based simulation models of the electric locomotive electrical part can be used for generating different train movement data for computer learning model to predict the electric locomotive parameters and scenarios (including emergencies) within the framework of the developed prescriptive system of automatic electric locomotive fault prevention en route.

Keywords: Digital twin, electric locomotive, simulation model, faults, computer learning.

References

1. Pires F., Cachada A., Barbosa J. et al. Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges. IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Helsinki, Finland, 2019, pp. 721–726. DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972134.
2. Errandonea I., Beltrán S., Arrizabalaga S. Digital twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 2020, Iss. 123. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.
3. Ghaboura S., Ferdousi R., Laamarti F. et al. Digital Twin for Rail-way: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 2023, Iss. 11, pp. 120237–120257. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042.
4. Donato L., Dirnfeld R., Somma A. et. al. Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 2023, Iss. 9, pp. 303–317. DOI: 10.1007/s40860-023-00208-6.
5. Lakin I. K., Semenov A. P. Ispol'zovanie tekhnologii “Tsifrovoy dvoynik” pri upravlenii remontom lokomotivov [Using the “Digital twin” technology in locomotive repair management]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 89–98. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89–98. (In Russian)
6. Adadurov A. S., Fedorova V. I., Boyko A. M. Obshee printsipy postroeniya prediktivnoy sistemy diagnostiki novogo elektropoezda ES2G “Lastochka” i pervye eksperimental'nye dannye [General principles of constructing a predictive diagnostic system for the new ES2G “Lastochka”

electric train and the first experimental data]. *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists]. 2022, Iss. 75-2, pp. 14–22. (In Russian)

7. Adadurov A. S., Fedorova V. I., Perevyazkin A. A. Apparato-programmnyy kompleks preskriptivnoy sistemy diagnostiki dlya elektropoezda “Lastochka” [Hardware and software complex of the prescriptive diagnostic system for the Lastochka electric train]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2023, Iss. 2, pp. 16–19. (In Russian)

8. Abolmasov A. A., Lisin D. O., Mel'nikov V. A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya elektricheskikh mashin lokomotivov po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniya [Improving the methods of diagnosing locomotive electric machines based on microprocessor control systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 69–75. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75. (In Russian)

9. Khabarov R. A., Raevskiy M. M. Prediktivnaya diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya detaley, agregatov i sistem podvizhnogo sostava [Predictive diagnostics of the technical condition of parts, units and systems of rolling stock]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 217–227. (In Russian)

10. Repeshko N. A. Printsipy raboty “Umnogo lokomotiva” [Operating principles of the “Smart Locomotive”]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport: science, education, production: collected works of the International scientific and practical conference]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2018, vol. 2, pp. 171–174. (In Russian)

11. Ivankov D. O., Ponyatov A. A. Printsipy raboty “Umnogo lokomotiva” [Operating principles of a “Smart Locomotive”]. *Tekhnika i tekhnologii nazemnogo transporta: materialy IV Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-*

prakticheskoy konferentsii [Ground transport engineering and technology: materials of the IV International student scientific and practical conference]. Nizhniy Novgorod: Filial federal'nogo gosdarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya “Samarskiy gos. un-t putey soobshcheniya” v g. Nizhnem Novgorode Publ., 2022, pp. 282–287. (In Russian)

12. Budaev A. A. K voprosu ob avtomatizatsii protsessov diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya i ekspluatatsionnykh pokazateley elektropodvizhnogo sostava na osnove tekhnologii “tsifrovoy dvoynik” [On the issue of automation of diagnostics processes for the technical condition and performance indicators of electric rolling stock based on the “digital twin” technology]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu rossiyskoy nauki* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2024, pp. 94–99. (In Russian)

13. Budaev A. A., Solov'ev A. N. Printsipy postroeniya imitatsionnykh modeley elektrovozov po tekhnologii “tsifrovoy dvoynik” [Principles of constructing simulation models of electric locomotives using the “digital twin” technology]. *Issledovanie i razvitie rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Research and development of rail and road transport: collection of papers of the International scientific and practical conference]. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2024, pp. 39–43. (In Russian)

Received: December 09, 2024

Accepted: January 31, 2025

Author's information:

Artyom A. BUDAEV — Postgraduate Student;
artem.bydaev2@yandex.ru

Evgeniy A. TRETYAKOV — Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor; eugentr@mail.ru