

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОТКАЗОВ В ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ

А. А. Будаев¹, Е. А. Третьяков², А. В. Раздобаров³

¹ аспирант каф. «ЭПС», ОмГУПС, г. Омск;

² д.т.н., доцент, профессор каф. «ЭПС», ОмГУПС, г. Омск;

³ ст. преподаватель каф. «ЭПС», ОмГУПС, г. Омск

Аннотация. Целью данной работы является моделирование неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов путем создания наборов данных с различными параметрами движения для машинного обучения моделей прогнозирования параметров и различных состояний электроподвижного состава в рамках разрабатываемой системы автоматизированного предотвращения отказов в пути следования. Для достижения цели использовались методы имитационного компьютерного моделирования, математической статистики и теории электрической тяги. Полученные результаты могут найти практическое применение в области диагностики и мониторинга технического состояния электроподвижного состава в пути следования для автоматизированного предотвращения отказов, в том числе в условиях малолюдных и беспилотных технологий.

Ключевые слова: цифровой двойник, электроподвижной состав, имитационная модель, неисправности, моделирование, автоматизированное предотвращение.

В настоящее время в компании ОАО «РЖД» активно разрабатываются и внедряются инновационные технические средства на основе таких технологий как: большие данные, машинное обучение, искусственный интеллект, цифровой двойник и т.д. Современным этапом развития электроподвижного состава железных дорог является разработка технологии выбора способов предотвращения неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов в пути следования. Актуальность разработки и внедрения цифровых двойников на электроподвижном составе полностью соответствует стратегическим целям ОАО «РЖД», что подтверждается Паспортом комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г., где данная технология является элементом группы инновационных проектов «Подвижной состав 2025» [1].

Целью работы является моделирование неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов для машинного обучения моделей прогнозирования параметров в рамках разрабатываемой системы автоматизированного предотвращения отказов в пути следования.

Для предотвращения отказов электровозов с помощью цифрового двойника можно предсказывать последствия неисправностей или различных состояний

электрического оборудования, а также оказывать поддержку и предлагать возможные действия. В рассматриваемом контексте возможности реализации цифрового двойника гораздо шире текущей предиктивной диагностики электроподвижного состава. Предлагаемое решение для автоматизированного предотвращения отказов электровозов в пути следования на основе технологии «Цифровой двойник» представлено на рисунке 1.

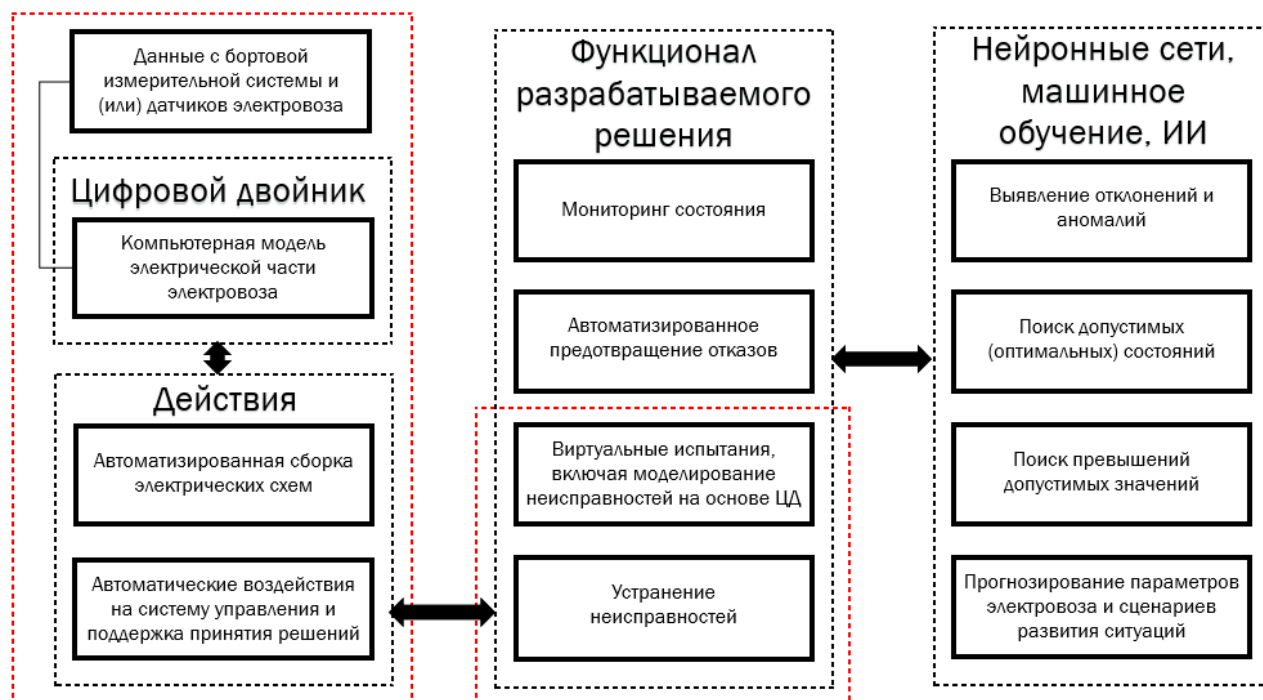


Рисунок 1 – Предлагаемое решение на основе технологии «Цифровой двойник»

В работах отечественных и зарубежных исследователей наблюдается большой интерес к разработке и использованию цифровых двойников в контексте производства и ремонта электроподвижного состава. В исследованиях И. К. Лакина, А. П. Семёнова представлены результаты исследований, в которых технология «Цифровой двойник» развивается в рамках предиктивной технической диагностики состояния электроподвижного состава для технического обслуживания и текущего ремонта по фактическому состоянию с учётом информации из бортовых измерительных устройств и статистики ремонта на протяжении всего жизненного цикла [2]. В исследованиях А. С. Ададунова, В. И. Фёдорова и др. представлены результаты разработки программно-аппаратного комплекса предиктивной диагностики ряда узлов электропоездов ЭС2Г «Ласточка». Авторами не представлена комплексная цифровая компьютерная модель электрической части электроподвижного состава [3, 4].

В работах зарубежных исследователей Н. Боссо, Е. Бернал, К. Ву и др. рассматривается комплексная методика построения цифровых двойников и их взаимосвязей с методами искусственного интеллекта, машинного обучения, больших данных и компьютерного зрения [5, 6]. В исследованиях [7] авторами представлены различные подходы к применению цифровых двойников, которые позволят использовать методы прескриптивной диагностики для оптимизации процессов обслуживания и ремонта на основе прогнозов. Зарубежными авторами не рассматриваются процессы разработки и внедрения цифрового двойника для

прогнозирования (моделирования) неисправностей и различных состояний электрического оборудования электровозов.

Как известно, в основе понятия «цифровой двойник» находится компьютерная имитационная модель, верифицированная на основе реальных данных, накапливаемая информация о параметрах объекта и их изменений, а также связей с внешней средой. Рассмотрим подробнее пример построения компьютерной модели электрической части электровоза серии 2ЭС6 для получения набора данных, необходимых для машинного обучения поиска неисправностей в пути следования и их последующего предотвращения в автоматическом режиме. Нейронная сеть не может быть обучена за требуемое время только на экспериментальных данных из-за их ограниченного объема.

В данной работе выполнено моделирование неисправностей и различных состояний электрооборудования электровозов для автоматизированного предотвращения отказов в пути следования на основе цифрового двойника электровоза 2ЭС6, разработанного в программном обеспечении *Matlab* с использованием графической среды *Simulink* [8, 9]. Модель состоит из набора готовых и разработанных блоков и элементов, где реализованы системы управления и аппараты защиты. Компьютерная модель электрической части электровоза представлена на рисунке 2.

В качестве исходных данных использованы паспортные данные тягового электродвигателя постоянного тока ЭДП810, которые вносились в блок «*DC Machine*». Недостающие параметры рассчитаны по методике И. В. Черных [10].

Быстродействующий выключатель и дифференциальное реле реализованы в подсистеме «*QF1/KA1*» и выполняют роль аппаратов защиты оборудования электровоза. Пусковой реостат «*R3-R4*» состоит из блоков сопротивлений, реализованных с помощью последовательно соединенных резисторов и контакторов, которые закрываются в определенное время, ступенчато уменьшая сопротивление в цепи. В подсистемах «Момент_Гл/Пр» рассчитывается вращающий момент на валах тяговых электродвигателей на основе расчетной силы тяги, взятой с бортовой измерительной системы, и тягового расчета. Независимое возбуждение реализовано в подсистеме «*НВ_1/4*», с помощью обратной связи по току якоря, регулировка тока возбуждения осуществляется по следующему закону (1):

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в,уст}} + k \cdot I_{\text{я}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{в,уст}}$ – ток возбуждения уставки;
 k – коэффициент компаундирования;
 $I_{\text{я}}$ – ток в обмотках якорей ТЭД.

Кроме этого, имеется возможность для задания тока возбуждения на основе данных с регистратора параметров движения и автоведения (РПДА) электровоза.

Для примера был выбран режим короткого замыкания в электрической части электровоза 2ЭС6: 1) в цепях тяговых электродвигателей; 2) в статическом преобразователе СТПр-1000 (Подсистемы «*НВ_1/4*»).

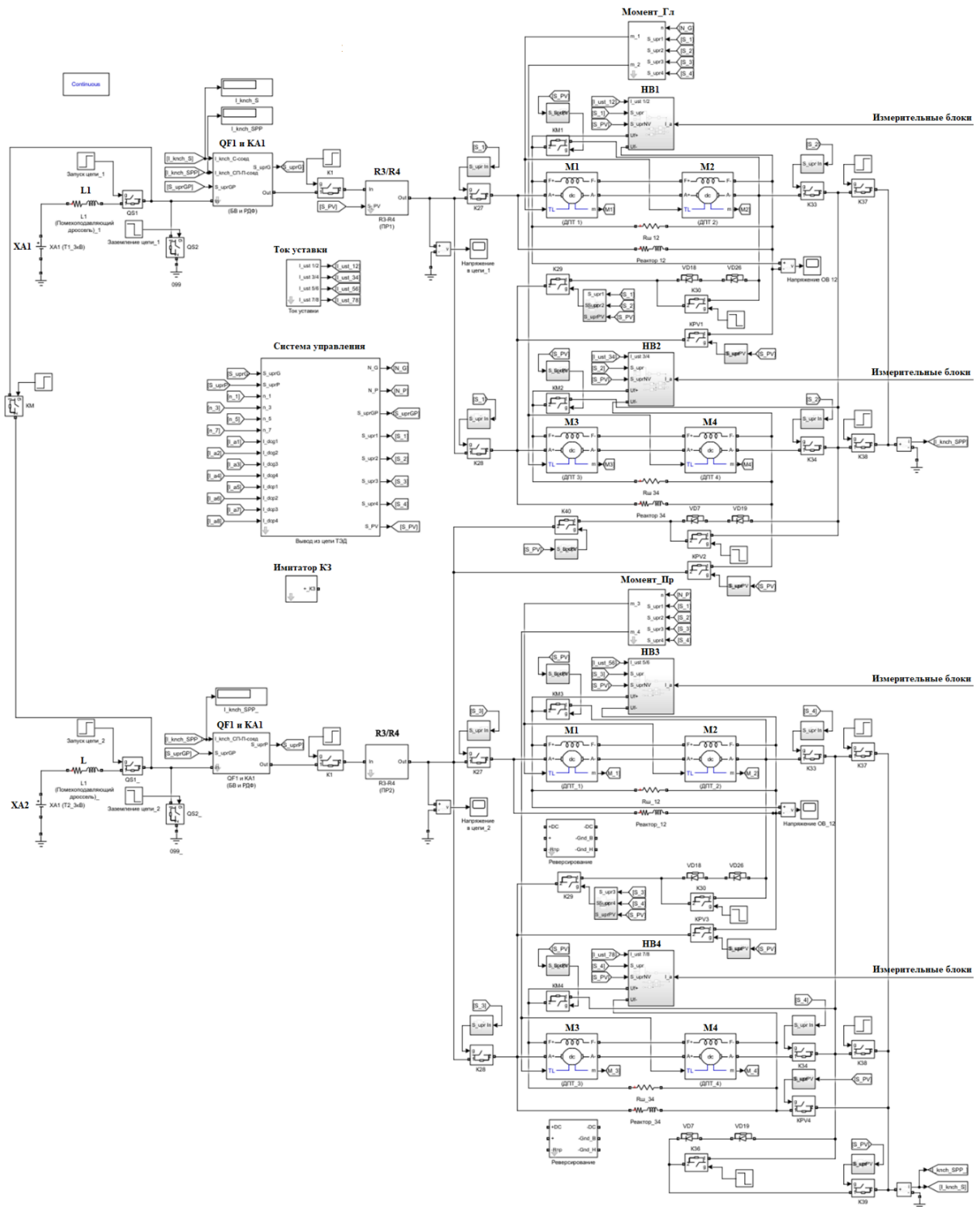


Рисунок 2 – Компьютерная модель электрической части электровоза 2ЭС6

Моделирование возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6

Для реализации данных неисправностей была разработана подсистема «Имитатор КЗ» (рис. 3), которую можно подключить в любую точку компьютерной модели. Время начала и окончания режима короткого замыкания задается с помощью диалогового окна.

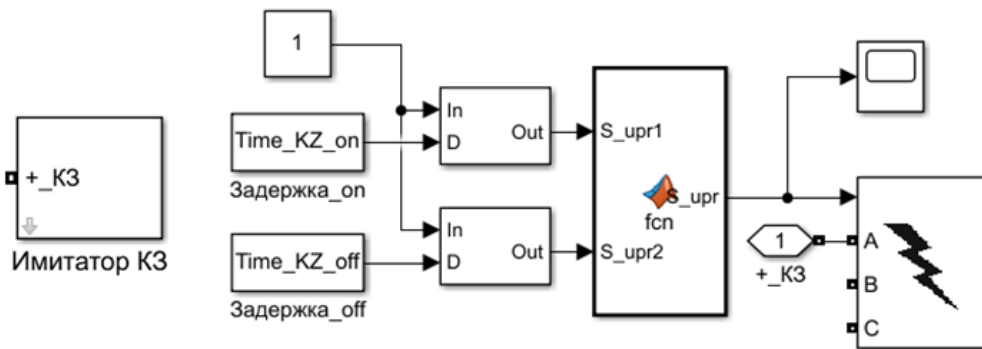


Рисунок 3 – Подсистема «Имитатор КЗ»

Перед началом моделирования неисправностей выполнен запуск цепи для получения зависимостей основных параметров от общего времени. Моделирование длилось 65 секунд, за данный период было реализовано 23 позиции пускового реостата для С-соединения ТЭД. Полученные графики представлены на рисунке 4.

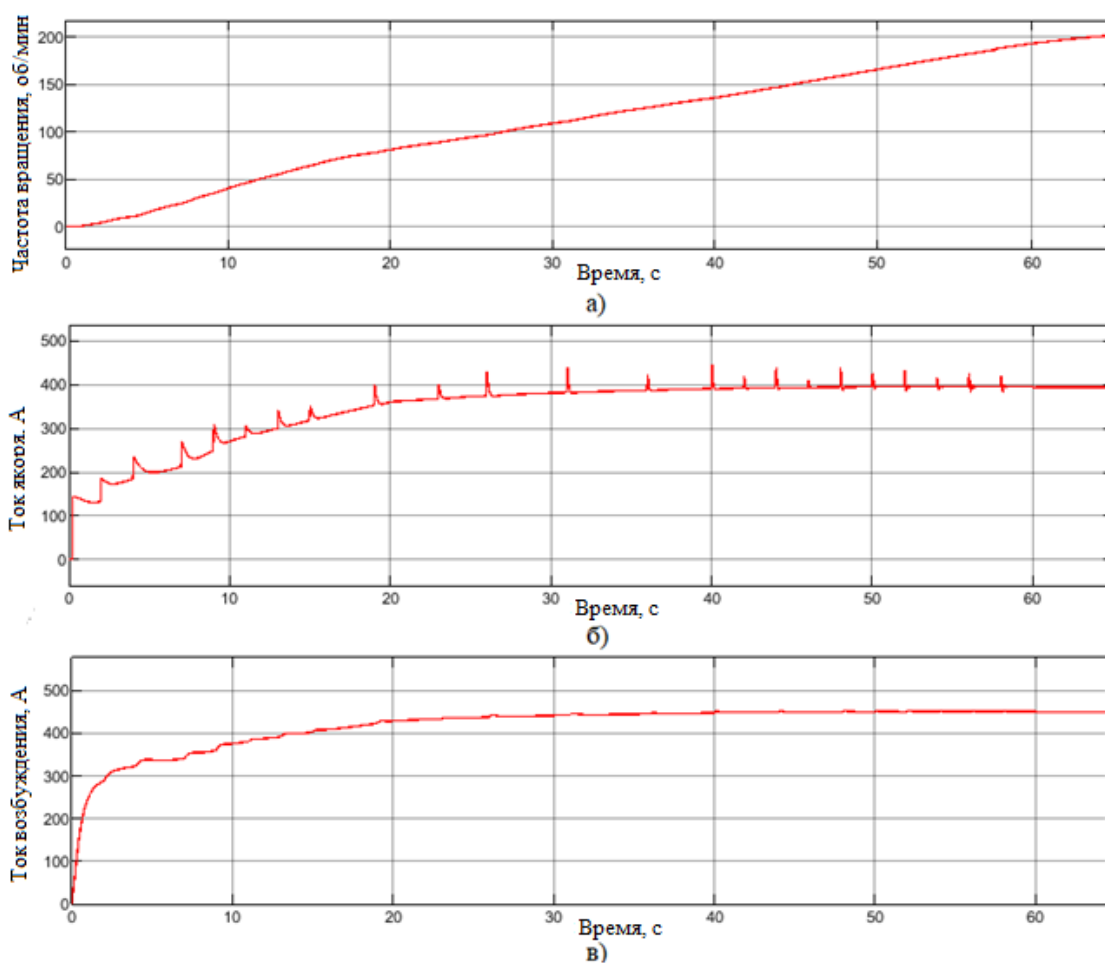


Рисунок 4 – Параметры первой пары ТЭД (M1/2) в головной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

Частота вращения ТЭД в конце моделирования составила 200,8 об/мин, ток якоря 393,2 А, а ток возбуждения 448,6 А. Параметры на всех двигателях идентичны с разницей не более одного процента, так как соединены последовательно.

1) Моделирование режима КЗ в цепях ТЭД.

Блок «Имитатор КЗ» подключен к первой паре ТЭД в прицепной секции, короткое замыкание происходит на 15-й секунде. После возникновения режима КЗ, аппаратами защиты фиксируются отклонения параметров и формируются сигналы, которые передаются в систему управления для проверки всех пар ТЭД. Определив неисправную пару ТЭД от системы поступают управляющие сигналы на соответствующие контакторы, выводя неисправную пару ТЭД из цепи. Результаты моделирования представлены на рисунке 5.

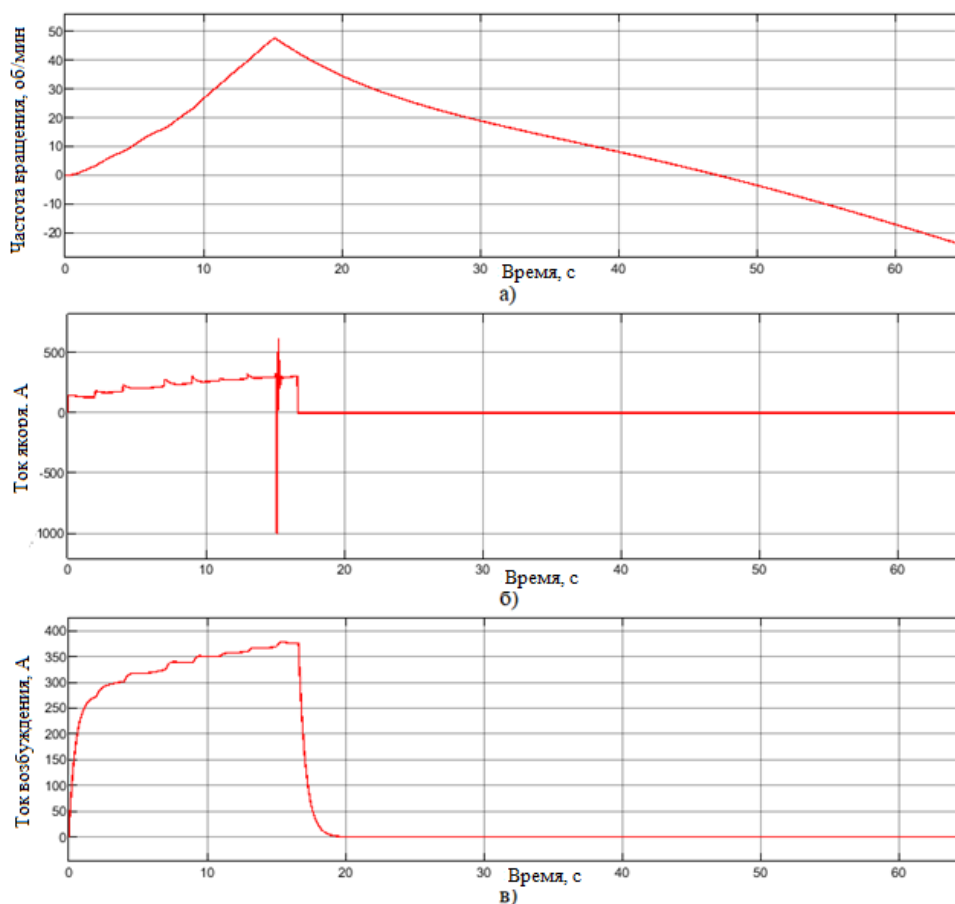


Рисунок 5 – Параметры первой пары ТЭД (М1/2) в прицепной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

При возникновении режима КЗ наблюдается бросок тока, который превышает значения уставок аппаратов защиты. Ток снизился до нуля после вывода из цепи неисправной пары ТЭД. До 15-й секунды частота вращения находилась в тех же пределах, что и при нормальном режиме работы, после появления короткого замыкания значение стало снижаться. Совместно с неисправной парой ТЭД была выведена и подсистема, питающая обмотки возбуждения. Графики зависимостей второй пары ТЭД (М3/4) в прицепной секции представлены на рисунке 6.

На графиках видно, что после возникновения короткого замыкания ток якоря увеличился на 120 А, а в конце моделирования составил 553,2 А, разница с нормальным режимом работы составила ~40%. Ток возбуждения в конце моделирования равнялся 513,8 А, разница составила ~14%. Частота вращения во время моделирования КЗ практически не изменилась, так как нагрузка с неисправных ТЭД была распределена на оставшиеся тяговые электродвигатели.

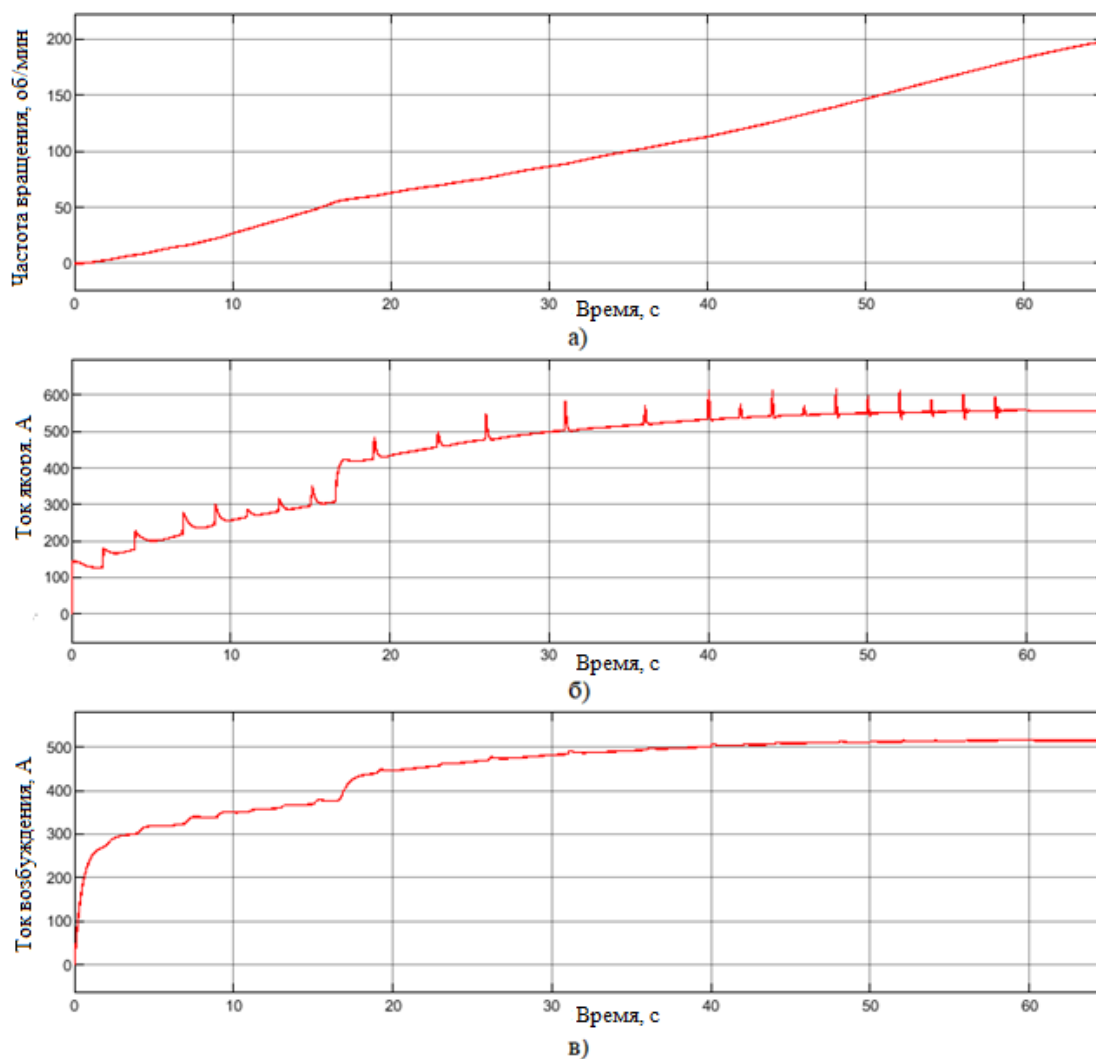


Рисунок 6 – Параметры второй пары ТЭД (М3/4) в прицепной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

2) Моделирование режима КЗ в СТПР-1000 (НВ_1/4)

Блок «Имитатор КЗ» подключен к подсистеме «НВ_2» в головной секции, который выполняет функцию СТПР-1000. Режим КЗ реализован на 10-й секунде, происходит срабатывание аппаратов защиты, сигналы поступают в систему управления, где происходит проверка токов всех ТЭД, после обнаружения места возникновения короткого замыкания из цепи выводится подсистема «НВ_2» вместе с соответствующей парой ТЭД (М3/4). На контакторы поступают сигналы для переключения всех двигателей на последовательное возбуждение. Полученные графики зависимостей представлены на рисунке 7 (исправные ТЭД) и 8 (неисправные ТЭД).

Частота вращения ТЭД на последовательном возбуждении составила 211 об/мин. Ток якоря до 10-й секунды изменялся ступенчато, после режима КЗ произошел переход на последовательное возбуждение и сброс позиций пускового реостата, значение в конце моделирования составило 126,4 А. Ток возбуждения изменялся согласно уравнению (1) в подсистеме «НВ_1», после перехода на последовательное возбуждение параметр принимал те же значения, что и ток якоря.

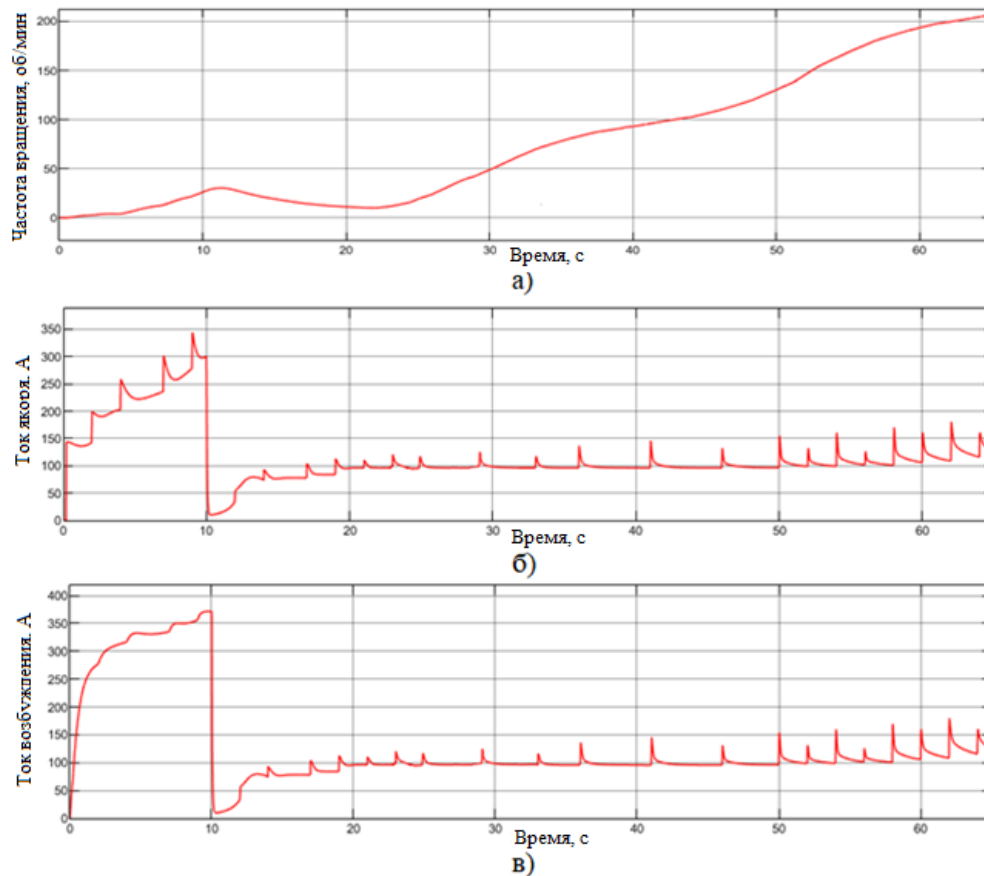


Рисунок 7 – Параметры первой пары ТЭД (M1/2) в головной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

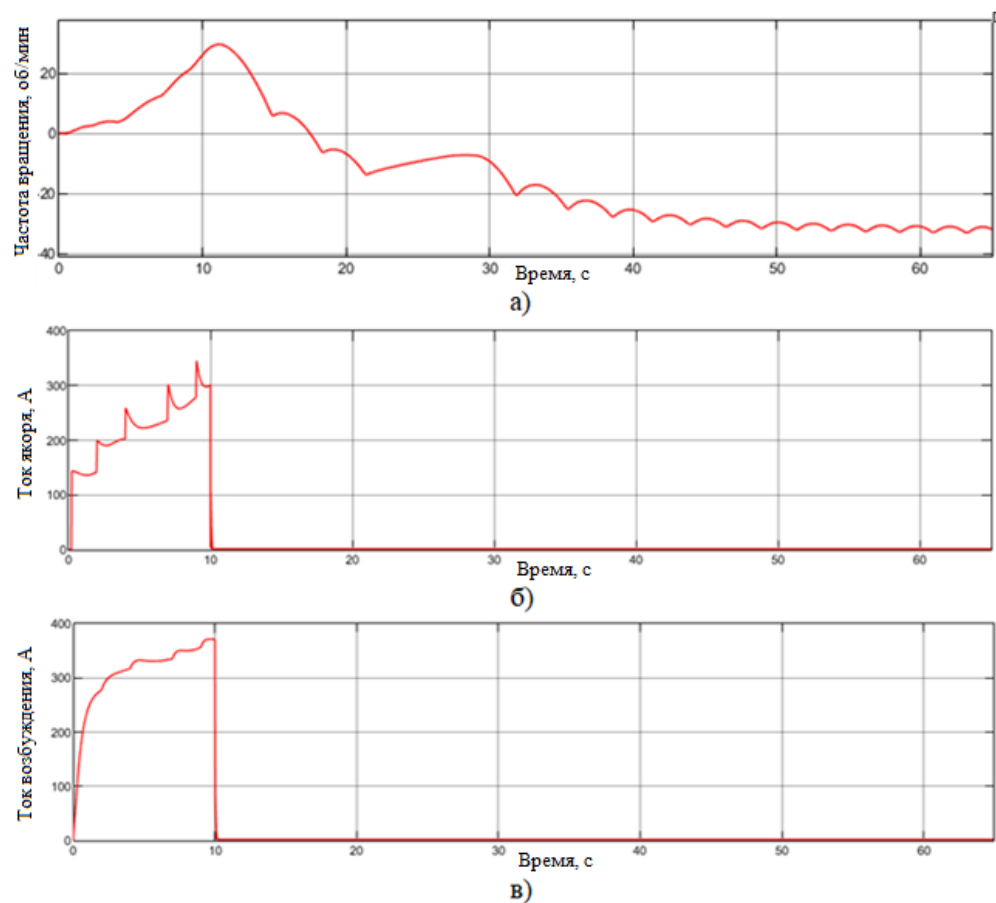


Рисунок 8 – Параметры второй пары ТЭД (3/4) в головной секции: а) частота вращения; б) ток якоря; в) ток возбуждения

На второй паре ТЭД (3/4) с неисправной подсистемой «НВ_2» частота вращения до начала моделирования режима КЗ в СТПр-1000 изменялась в том же диапазоне, что и при нормальном режиме работы цепи. На 10-й секунде при переходе на последовательное возбуждение и выводе неисправной подсистемы с соответствующими двигателями частота вращения снизилась. Ток якоря и ток возбуждения после режима КЗ снизились до нулевого значения.

Для проверки достоверности разработанной компьютерной модели электрической части электровоза 2ЭС6 использовались данные с бортовой измерительной системы. Результаты моделирования представлены на рисунке 9. В модель вносились следующие данные с помощью блоков построителей сигналов: напряжение в контактной сети; позиции переключения пускового реостата для С-соединения ТЭД; сила тяги; ток возбуждения. Моделирование длилось 180 секунд, за это время было реализовано 23 позиции пускового реостата. Для определения сходимости полученных значений выполнен расчет коэффициента корреляции Пирсона, который составил: частота вращения – 99%; ток якоря – 98,5%; ток возбуждения 99,6%.

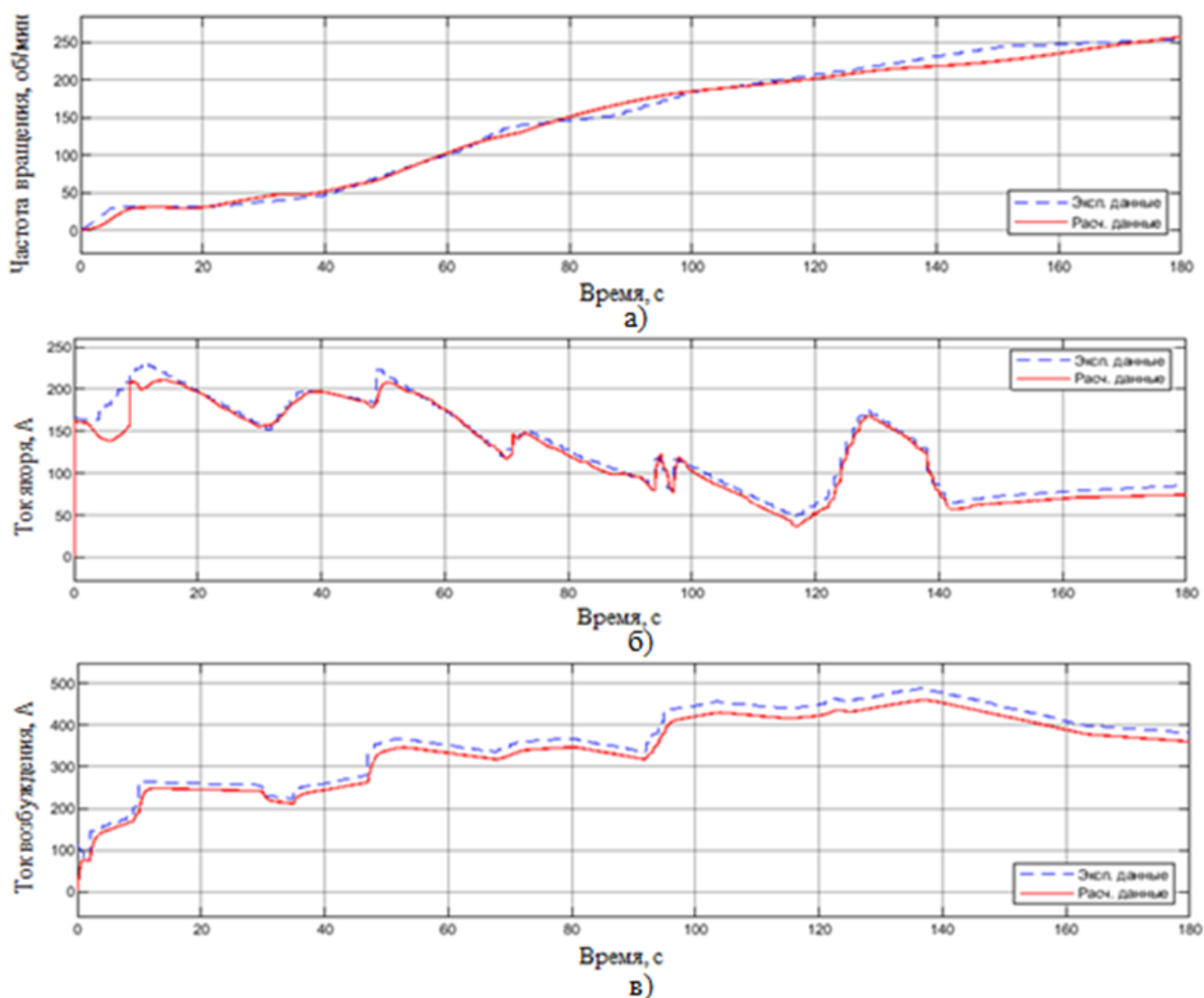


Рисунок 9 – Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных данных

Валидация разработанной модели электрической части электровоза 2ЭС6

Разработанная компьютерная модель электрической части электровоза 2ЭС6 позволяет моделировать возможные неисправности и различные состояния электрического оборудования, может использоваться для создания моделей прогнозирования параметров и сценариев развития ситуаций на основе методов машинного обучения и нейронных сетей, а также для проведения виртуальных испытаний по технологии цифровой двойник. Полученные данные могут использоваться для определения оптимальных режимов работы электровоза при различных эксплуатационных воздействиях.

Применение цифрового двойника позволит повысить надежность и энергоэффективность магистрального грузового электровоза в условиях малолюдных или беспилотных технологий.

Список использованных источников

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 19.08.2024 N 2009/р «Об утверждении паспорта Комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года». – URL: <https://company.rzd.ru/9990/page/103290?> (Дата обращения 17.03.2025).
2. Лакин И. К., Семенов А. П. Использование технологии «цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2019. № 3(63). С. 89–98.
3. Ададуров А. С., Федорова В. И., Бойко А. М. Общие принципы построения предиктивной системы диагностики нового электропоезда ЭС2Г «Ласточка» и первые экспериментальные данные // Национальная Ассоциация Ученых, 2022. № 75-2. С. 14–22
4. Ададуров А. С., Федорова В. И., Перевязкин А. А. Аппаратно-программный комплекс прескриптивной системы диагностики для электропоезда «Ласточка» // Автоматика, связь, информатика, 2023. № 2. С. 16–19.
5. E. Bernal, Q. Wu, M. Spiriyagin and C. Cole, Augmented digital twin for railway systems, in Vehicle System Dynamics, (2023).
6. N. Bosso, Application of machine learning techniques to build digital twins for long train dynamics simulations. / Magelli, M., Trincherо, R., Zampieri, N. // Vehicle System Dynamics. 2023. Vol. 62(1). PP. 21-40.
7. De Donato, L. Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture / Dirnfeld, R., Somma, A. [et al] // Journal of Reliable Intelligent Environments. 2023. Vol. 9. PP. 303-317.
8. Будаев А. А., Третьяков Е. А. Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. №. 1. С. 92-101.
9. Разработка системы автоматизированного предотвращения и устранения неисправностей магистрального электровоза в пути следования / Е. А. Третьяков, А. П. Шиляков, И. Н. Денисов [и др.] // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : Материалы VIII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 100-летию со дня рождения профессора Александра Сергеевича Лисовского, Омск, 14–15 ноября 2024 года. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2024. С. 20-27.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink : практическое руководство / И. В. Черных ; под ред. Д. А. Мовчак. – Москва : ДМК Пресс ; СПб.: Питер, 2008. 288 с.: ил.