

Кибер-физический подход к управлению системами электроснабжения железных дорог

Ю. Н. Булатов

Братский государственный университет
Братск, Россия
bulatovyura@yandex.ru

А. В. Крюков

Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия
and_kryukov@mail.ru

К. В. Суслов

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия
dr.souslov@yandex.ru

Аннотация. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке цифровых моделей, применимых при создании кибер-физических систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД). Для ее достижения применялись методы моделирования режимов, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения. Эти методы, реализованные в промышленном программном комплексе Fazonord, базировались на использовании фазных координат и решетчатых схем замещения, представляющих собой полные графы, ветви которых образованы электрическими импедансами. Они позволяют рассчитывать сложносимметричные, несинусоидальные и предельные режимы; обеспечивают адекватное моделирование активных элементов интеллектуальных электрических сетей smart grid; дают возможность решения дополнительных задач, например, таких как определение электромагнитных влияний на смежные линии электропередачи, а также моделирование электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи и тяговыми сетями. Их отличительные особенности в мультифазности, мультирежимности и мультизадачности.

Ключевые слова: кибер-физические системы; системы электроснабжения железных дорог; моделирование; управление

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы электроснабжения магистральных железных дорог (СЭЖД) переменного тока являются сложными системами [1], включающими два тесно взаимосвязанных сегмента: физического, состоящего из силовых элементов, обеспечивающих подвод электрической энергии к подвижному составу и стационарным объектам транспорта, и информационно-управляющего. В процессе реализации отдельных этапов проводимого в настоящее время цифрового перехода электроэнергетики [2–7] сложность последнего сегмента, который обеспечивает управление, становится сопоставимой с физической (технологической) частью СЭЖД. Поэтому ее можно отнести к классу кибер-физических систем электроснабжения (КФСЭ), состоящих в данном случае из силовых объектов (линий электропередачи, трансформаторов, контактных подвесок и т.д.), измерительных комплексов, сетей передачи информации и управляющих компьютеров, использующих интеллектуальные алгоритмы. Концепция КФСЭ основана на глубокой интеграции вычислительных ресурсов в физические процессы [5]. В отличие от автоматизированных

систем управления промышленными объектами в КФСЭ обеспечивается более тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами. Мониторинг и управление энергетическими процессами осуществляется с использованием большого числа обратных связей; при этом результаты работы алгоритмов оказывают влияние на физические компоненты, а информация о режимах работы СЭЖД и текущих параметрах ее отдельных элементов используется для модификации алгоритмов управления и перенастройки автоматических регуляторов. Укрупненная структура КФСЭ показана на рис. 1.

II. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вопрос создания кибер-физических энергосистем и систем электроснабжения посвящено значительное число работ, часть из которых представлена в библиографическом списке к данной статье [8–26]. Решению задач анализа надежности КФСЭ посвящены работы [9–15]. В статьях [5, 16, 17] рассматриваются вопросы кибернетической безопасности КФСЭ. Отдельным аспектам моделирования и управления КФСЭ посвящены работы [18–26]. Однако задачи использования кибер-физического подхода для модернизации систем электроснабжения железных дорог в доступных авторам работах не рассматриваются.

При создании кибер-физических энергосистем и систем электроснабжения предполагается использовать самые современные информационные и компьютерные технологии [27]: искусственный интеллект, большие данные, интернет вещей, квантовые вычисления и др. Однако ядро виртуальной части КФСЭ должны образовывать цифровые модели, основанные на алгоритмах решения традиционных электротехнических задач. К ним можно отнести задачи расчета нормальных и аварийных режимов, определение показателей качества электроэнергии по отклонениям и колебаниям напряжений, а также уровням несимметрии и гармонических искажений [28–30]. Кроме того, для эксплуатационной практики необходимо решение задач обеспечения безопасности персонала [31], планирования режимов плавки гололеда, определения температур нагрева проводов и теплового износа трансформаторов [32].

Для решения перечисленных задач можно использовать методы и алгоритмы, предложенные в работах [28–31], основанные на применении фазных координат.



Рис. 1. Структура кибер-физической системы электроснабжения

Реализованные на основе этих методов модели удовлетворяют следующим требованиям:

- позволяют рассчитывать сложннесимметричные (нормальные и аварийные), несинусоидальные и предельные режимы;
- обеспечивают адекватное моделирование активных элементов, таких как регулируемые источники реактивной мощности, кондиционеры гармоник, вставки постоянного тока и т. д.;
- имеют возможность решения дополнительных задач, например, таких как определение электромагнитных влияний на смежные линии электропередачи, а также моделирование электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи и тяговыми сетями.

III. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КФСЭ

В основу методов, описанных в работах [28–31] и реализованных в промышленном программном комплексе Fazonord [28] положены идеи построения моделей элементов электроэнергетических систем (ЭЭС) и СЭЖД на основе фазных координат; при этом основные силовые элементы ЭЭС и СЭЖД, к которым можно отнести линии электропередачи, трансформаторы и контактные сети, рассматриваются как многопроводные или многообмоточные объекты и представляются в виде решетчатых схем замещения, имеющих полностью связанную топологию.

На основе этого подхода реализованы методы и компьютерные технологии, отличительные особенности которых состоят в следующем (рис. 2):

- *мультифазность*, заключающаяся в возможности моделирования мультифазных систем (однофазных, трехфазных, четырехфазных, шестифазных и различных их сочетаний в одной сети);
- *мультирежимность*, позволяющая моделировать широкий набор режимов ЭЭС и СЭЖД: нормальных и аварийных, несимметричных, несинусоидальных, предельных по статической аперидической устойчивости;
- *мультизадачность*, обеспечивающая возможность решения дополнительных задач, актуальных для практики: определение наведенных напряжений на смежные ЛЭП [28]; расчет напряженностей электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями [31]; параметрическая идентификация ЛЭП и трансформаторов по данным измерений, получаемых от устройств PMU WAMS [33]; учет активных элементов при моделировании СЭЖД [29]; моделирование тепловых процессов при плавке гололеда.

Структурная схема, поясняющая характер взаимосвязей между решаемыми в процессе мультифункционального моделирования задачами, представлена на рис. 3.



Рис. 2. Возможности мультифункционального моделирования ЭЭС

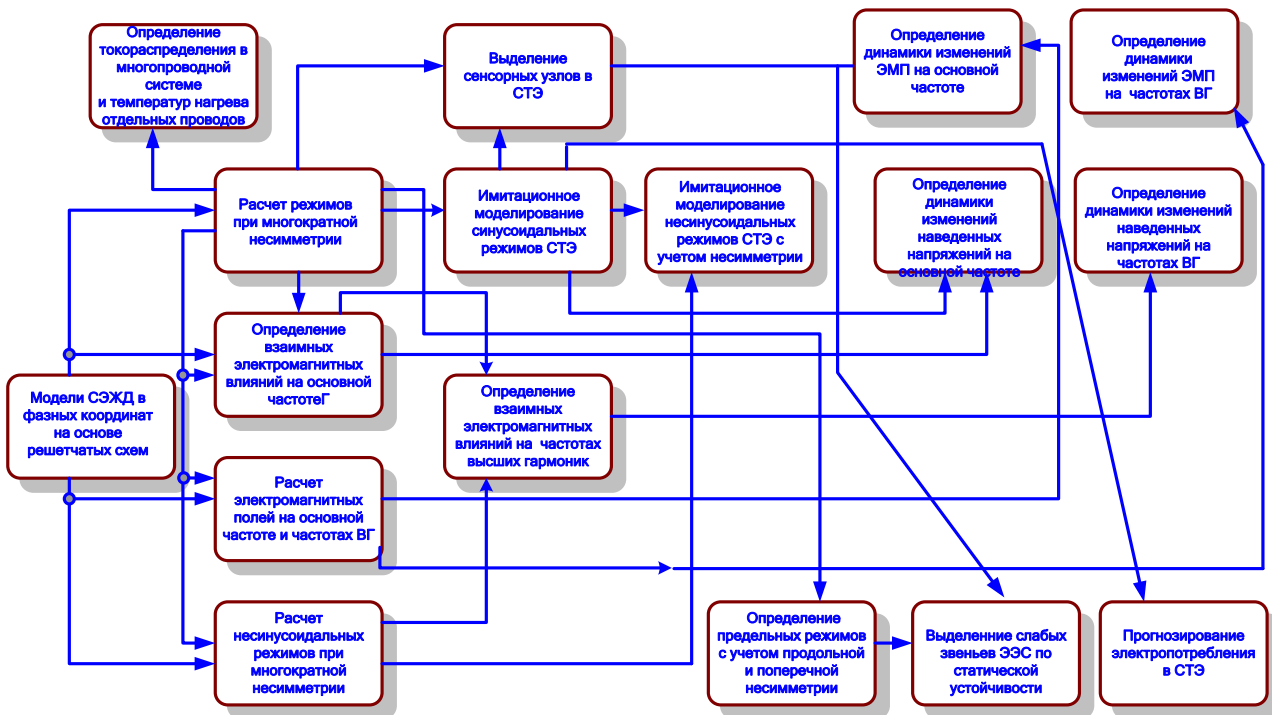


Рис. 3. Комплекс решаемых научно-технических задач

Система электроснабжения магистральной железной дороги является сложным динамическим объектом, который может быть описан системой нелинейных дифференциальных уравнений большой размерности

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \Phi(\mathbf{X}, \mathbf{V}, \mathbf{S}, \mathbf{C}, t) \quad (1)$$

где \mathbf{X} – n -мерный вектор параметров режима; Φ – n -мерная вектор-функция; \mathbf{V} – m -мерный вектор возмущающих воздействий; \mathbf{C} – ℓ -мерный вектор управлений; \mathbf{S} – q -мерный вектор, который составлен структурными параметрами СЭЖД.

Этой модели отвечает структурная схема, показанная на рис. 4.

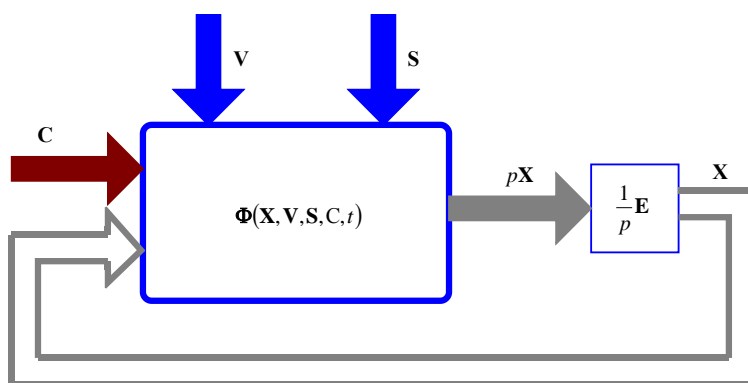


Рис. 4. Структурная схема, отвечающая модели (1): $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования; \mathbf{E} – единичная матрица

Ввиду большой размерности и сложности практическое использование модели (1) на современном этапе не представляется возможным. Поэтому для определения режимов СЭЖД применяют имитационные методы [28]; при этом используется концепция мгновенных схем и осуществляется редукция модели (1) к набору статических схем. Для проведения моделирования исследуемый интервал T_m разбивается на малые промежутки Δt . На каждом интервале параметры $\mathbf{X}, \mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{V}$ принимаются постоянными.

Создание имитационной модели СЭЖД требует построения моделей отдельных элементов с определением алгоритма их взаимодействия и включает следующие составные части: моделирование графика движения по-

ездов; формирование мгновенных схем, отвечающих каждому интервалу Δt и расчет режима для каждой из них; определение интегральных показателей имитационного моделирования.

На всех интервалах Δt решается следующая нелинейная система уравнений, которая описывает установившийся режим соответствующей мгновенной схемы

$$\mathbf{F}_k(\mathbf{X}_k, \mathbf{S}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{V}_k) = \mathbf{0},$$

где $\mathbf{X}_k, \mathbf{S}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{V}_k$ – значения векторов $\mathbf{X}, \mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{V}$ для k -ой мгновенной схемы.

Методология моделирования [28], реализованная в программном комплексе Fazonord, позволяет осуществлять расчеты режимов СЭЖД, включающей три слож-

ных подсистемы: систему тягового электроснабжения (СТЭ); систему внешнего электроснабжения (СВЭ), образованную высоковольтными сетями ЭЭС, примыкающими к тяговым подстанциям (ТП); и районы электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей (РЭС). В алгоритм моделирования может быть добавлен этап учета графиков изменения стационарных нагрузок, питающихся от сетей ЭЭС и РЭС. Структурная схема системы показана на рис. 5, а укрупненная схема алгоритма функционирования представлена на рис. 6.

В настоящее время и среднесрочной перспективе реально может быть доступна оперативная информация только по элементам СВЭ, непосредственно примыкающим к шинам высокого напряжения ТП. Поэтому при решении задач оперативного управления необходимо построение эквивалентной модели основной сети ЭЭС [34].

На рис. 5 приведены следующие основные сегменты электротехнического ядра КФСЭ:

- оценивание состояния по информации, поступающей по каналам информационной сети КФСЭ;
- прогнозирование нагрузок стационарных объектов;
- формирование упрощенной (эквивалентной) модели внешней сети ЭЭС и ее оперативная корректировка при изменениях схемно-режимной ситуации;
- моделирование на основе графиков движения поездов, тяговых расчетов, оценивания состояния СВЭ и прогнозирования стационарных нагрузок;
- формирование вектора управлений.

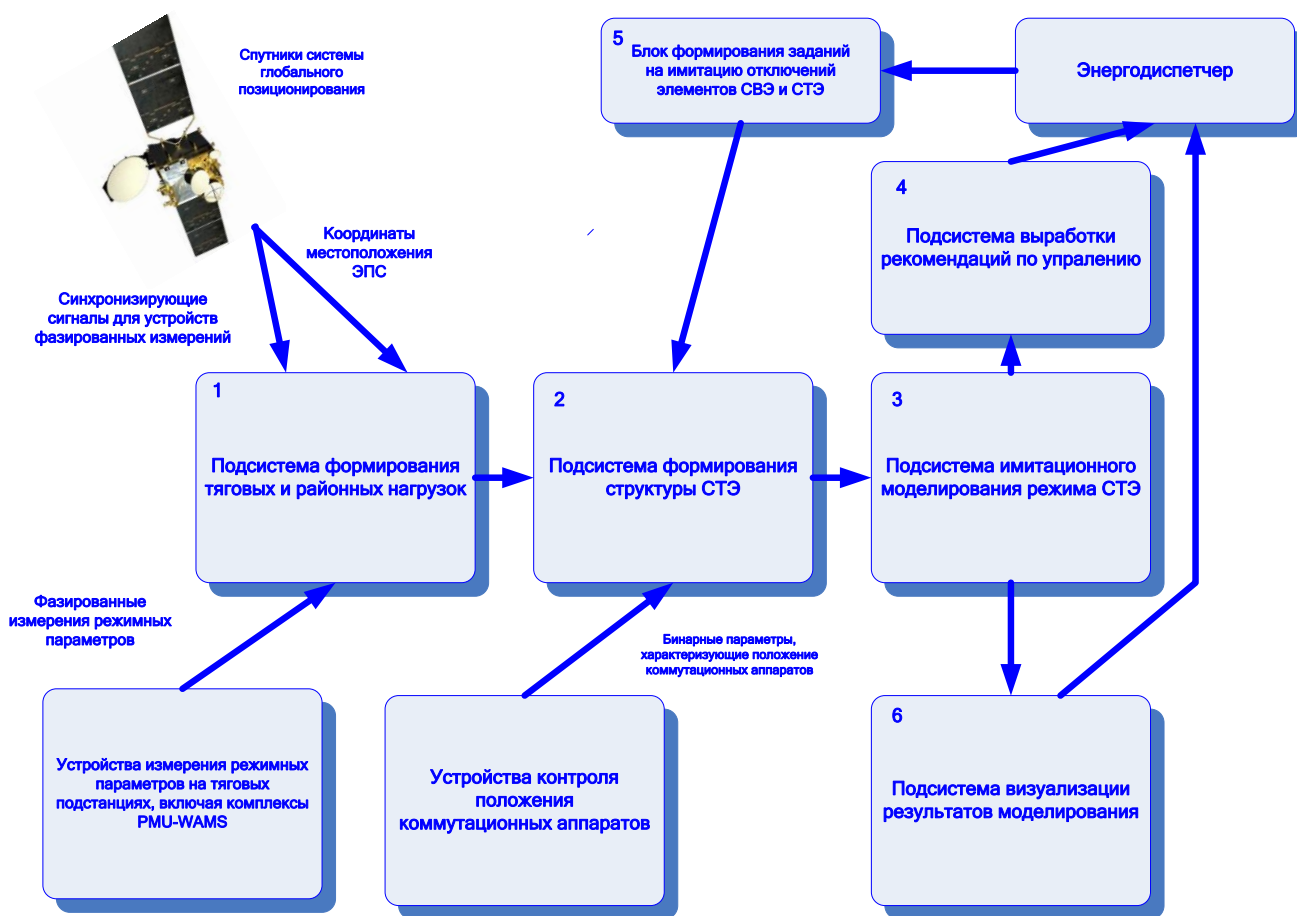


Рис. 5. Структурная схема оперативного управления

Цели реализации кибер-физического подхода состоят в следующем:

- бесперебойное электроснабжение тяги поездов, а также важных объектов железнодорожного транспорта, обеспечивающих безопасность их движения;
- обеспечение высокого качества электроэнергии на шинах 110-220 кВ ТП, в тяговых сетях 25 и 2х25 кВ, а также в РЭС;

- минимизация потерь электрической энергии в СТЭ и РЭС;
- обеспечение электромагнитной безопасности при воздействии на персонал электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями [31];
- эффективное управление режимами СТЭ, учитывающее массы поездов, размеры движения и профили пути.

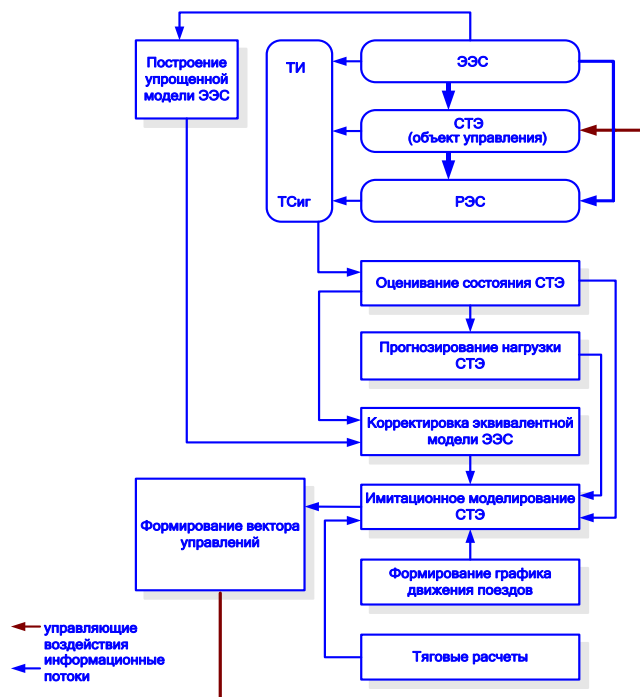


Рис. 6. Схема системы оперативного управления СЭЖД: ТИ – телеизмерения; ТСиг – телесигнализация

Особенность кибер-физического подхода состоит в том, что описанные выше цифровые модели непрерывно актуализируются на основе обработки измерительной информации, поступающей от устройств PMU WAMS [34], синхронизирующихся по сигналам спутников глобального позиционирования. Кроме того, спутниковые технологии [35] используются при формировании графиков движения поездов, что особенно актуально для высокоскоростных железнодорожных линий [36]. Так-

же, на основе измерений периодически осуществляется параметрическая идентификация силовых элементов СЭЖД [33].

При формировании КФСЭ может использоваться концепция энергетического интернета [37], согласно которой тяговая подстанция и примыкающие к ней сети 25 или 2x25 кВ могут рассматриваться как энергетические ячейки, рис. 7.

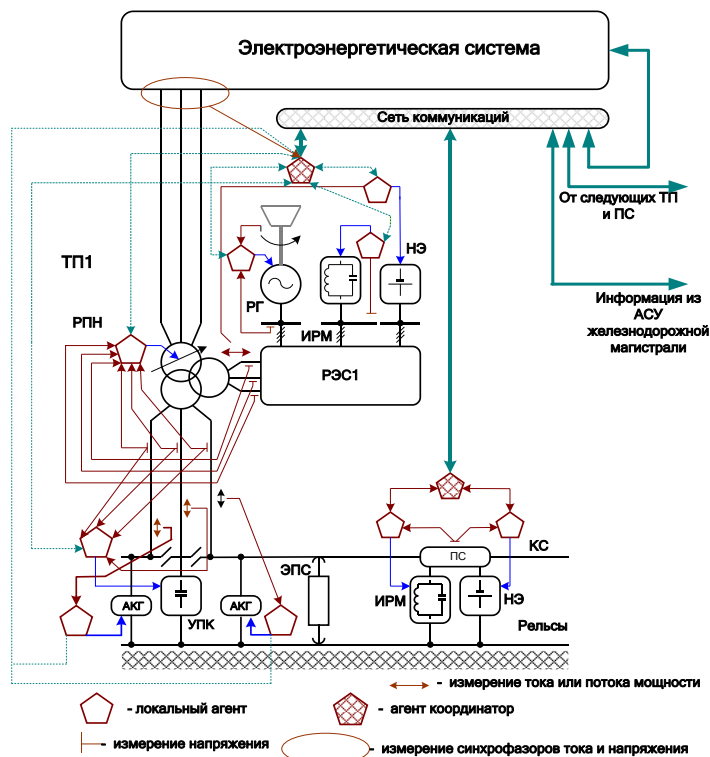


Рис. 7. Схема энергетической ячейки КФСЭ: ПС – подстанция; ЭПС – электроподвижной состав; КС – контактная сеть

В состав этих ячеек кроме штатного оборудования ТП и ТС могут входить следующие активные элементы smart grid: активные кондиционеры гармоник (АКГ);

управляемые источники реактивной мощности (ИРМ); установки продольной компенсации (УПК); накопители энергии (НЭ); установки распределенной генерации

(РГ); устройства регулирования под нагрузкой коэффициентов трансформации тяговых трансформаторов (РПН). Для управления энергетическими ячейками могут использоваться мультиагентные технологии [29].

IV. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КФСЭ

Ограниченный объем статьи не позволяет привести в полном объеме примеры моделирования СЭЖД на основе представленных выше технологий [28–34]. Поэтому ниже приведены примеры моделирования режимов и

условий электромагнитной безопасности, выполненные в программном комплексе Fazonord [28]. Рассматривалась СЭЖД, схема которой показана на рис. 8.

Моделировалось движение девяти поездов массой 4084 т в нечетном направлении (рис. 9а). Токвые профили поезда показаны на рис. 9б. Предполагалось, что на шинах 220 кВ ТП 4 установлен регулируемый ИРМ, обеспечивающий стабилизации линейных напряжений на уровне 216 кВ. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 9–13.

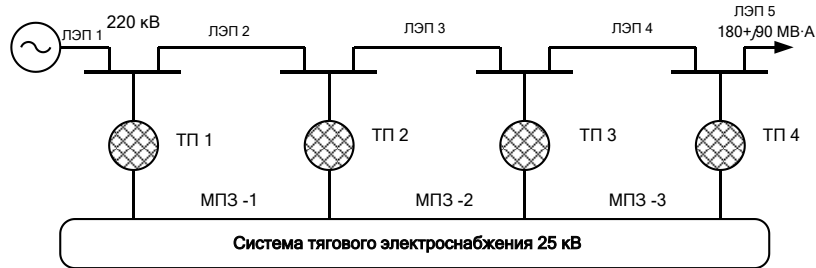
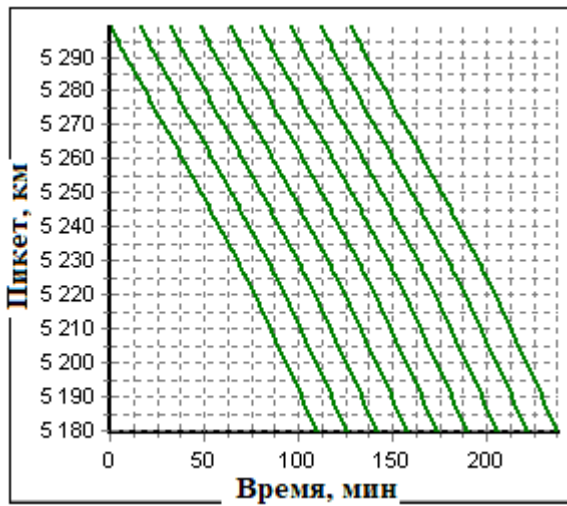
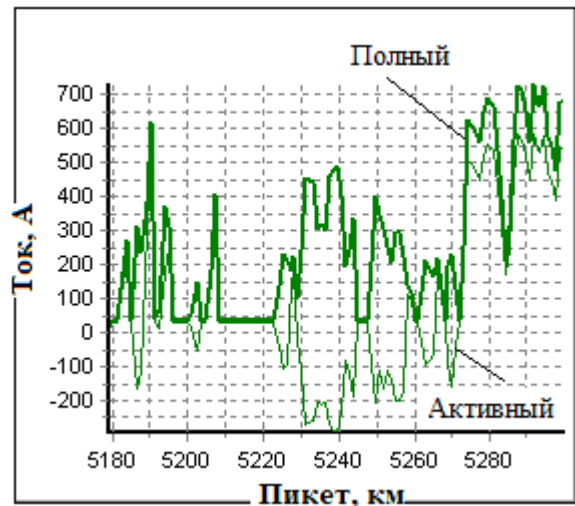


Рис. 8. Схема СЭЖД; МПЗ – межподстанционная зона

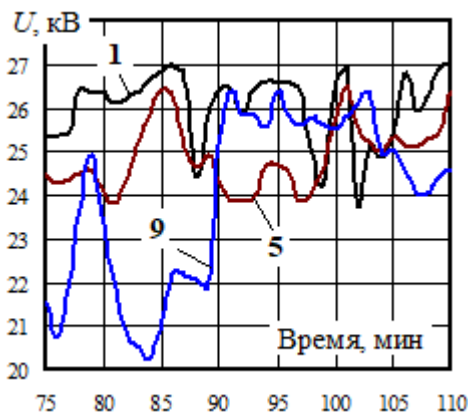


а)

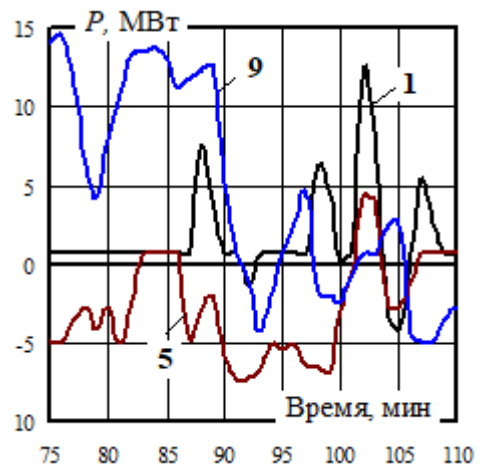


б)

Рис. 9. График движения (а) и профиль тока нечетного поезда массой 4084 т (б)



а)



б)

Рис. 10. Напряжения на токоприемниках электровозов (а) и активные мощности потребляемые (генерируемые) электровозами (б): цифрами обозначены номера поездов

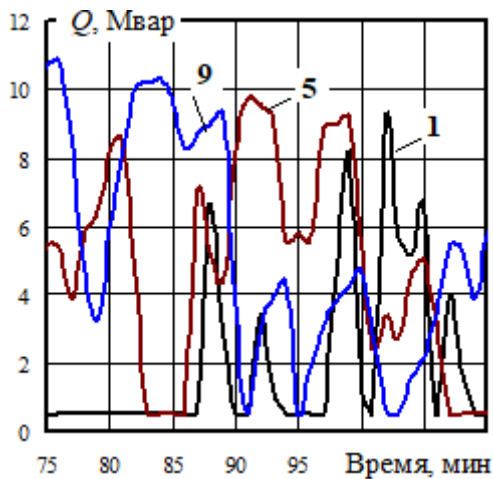


Рис. 11. Реактивные мощности потребляемые электровозами: цифрами обозначены номера поездов

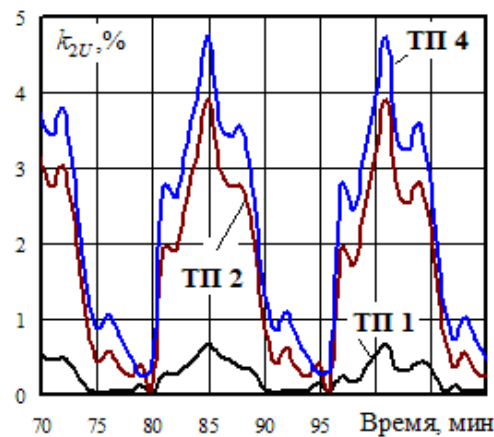


Рис. 12. Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП



Рис. 13. Суммарные коэффициенты гармоник на шинах 220 кВ ТП 3

Отрицательные значения активной мощности на рис. 10б соответствуют режимам рекуперативного торможения с возвратом электрической энергии в сеть. Результаты моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. На рассмотренном интервале моделирования наблюдается снижение напряжения на токоприемнике поезда № 9 ниже допустимого предела в 21 кВ, что требует коррекции режима, например, путем включения регулируемого ИРМ на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций, или ввод в действие установок УПК. Кроме того, повысить напряже-

ние на токоприемниках можно путем изменения уставки ИРМ, установленного на шинах 220 кВ ТП 4 при наличии резерва его установленной мощности.

2. Коэффициенты несимметрии на шинах 220 кВ ТП 2 и ТП 4 выходят за нормально допустимый предел 2 %. Если время превышения превышает значение в 5 %, то необходимо включение устройств симметрирования [30].
3. Коэффициенты гармоник на шинах 220 кВ ТП также выходят за допустимые пределы, что требует включения активных кондиционеров гармоник [29, 30].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены методы определения режимов киберфизических систем электроснабжения железных дорог переменного тока. На основе результатов компьютерного моделирования показано, что эффективные компьютерные модели для решения этих задач могут быть реализованы на основе методов моделирования ЭЭС и СЭЖД в фазных координатах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бадер М.П. Современные технологии для перехода к интеллектуальным системам электроснабжения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 2(50). С. 86-92.
- [2] Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. 2020. № 7. С. 12-21.
- [3] Воропай Н. И. От плана ГОЭЛРО к глобальному электроэнергетическому интернету // Электричество. 2020. № 12. С. 10-13.
- [4] Холкин Д., Чаусов И. Новая формула энергетического перехода // Энергетическая политика. 2020. № 12 (154). С. 40-53.
- [5] Колосок И.Н., Коркина Е.С. Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 121-131.
- [6] Джамалова З.И., Отуншиева А.Е., Обычайко Д.С., Шихин В.А. Анализ эксплуатационной надежности кибер-физических систем // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2018. № 1 (104). С. 215-227.
- [7] Иванов А.В., Кучеров Ю.Н., Самков В.М., Корев Д.А. Развитие стандартизации интеллектуальных систем электроснабжения будущего // Энергия единой сети. 2018. № 3 (38). С. 70-84.
- [8] Холкин Д.В., Чаусов И.С. Цифровой переход в энергетике России: в поисках смысла // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 7-16.
- [9] J. Huan, Y. Xiao, W. Lu, J. Li, H. Liu, Y. Zhao. "Impact Analysis of Energy Supply Reliability of a New Generation Cyber Physical Energy System Considering Multivariate Information Disturbance", 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). 2020. Publisher: IEEE.
- [10] S. Wang, Z. Wu, A. Su, S. Jin, Y. Xia and D. Zhao, "Reliability Modeling and Simulation of Cyber-Physical Power Distribution System Considering the Impacts of Cyber Components and Transmission Quality," 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018, pp. 6166-6171, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483971
- [11] D. Lin Q. Liu, Z. Li, G. Zeng, Z. Wang, T. Yu, J. Zhang, "Elaborate Reliability Evaluation of Cyber Physical Distribution Systems Considering Fault Location, Isolation and Supply Restoration Process," in IEEE Access, vol. 8, pp. 128574-128590, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007477
- [12] J. Guo, W. Liu, F. R. Syed and J. Zhang, "Reliability assessment of a cyber physical microgrid system in island mode," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 5, no. 1, pp. 46-55, March 2019, doi: 10.17775/CSEEJPES.2017.00770
- [13] P. Buason, H. Choi, A. Valdes and H. J. Liu, "Cyber-Physical Systems of Microgrids for Electrical Grid Resiliency," 2019 IEEE

- International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS), 2019, pp. 492-497, doi: 10.1109/ICPHYS.2019.8780336
- [14] R. He, H. Xie, J. Deng, T. Feng, L. L. Lai and M. Shahidehpour, "Reliability Modeling and Assessment of Cyber Space in Cyber-Physical Power Systems," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 3763-3773, Sept. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2982566.
- [15] M. Wenxiong, H. Jianfeng, C. Zhong and W. Yong, "Cyber-physical joint simulation on small interference stability of power grid," 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/EI2.2017.8245249
- [16] L. Li, Z. Li, Y. Liu, Z. Xiao, Y. Cai and F. Liu, "Vulnerability Analysis of Cyber-physical System Based on Improved Structural Entropy," 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2020, pp. 761-765, doi: 10.1109/EI250167.2020.9347045
- [17] X. Liu and C. Konstantinou, "Reinforcement Learning for Cyber-Physical Security Assessment of Power Systems," 2019 IEEE Milan PowerTech, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2019.8810568
- [18] L. Khruslov, M. Rostovikov, V. Shishov and S. Kireev, "Cyber-Physical Power System of Micro Smart Grid on the base of transformer substation 7000kVA," 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2018.8447103
- [19] E. kaur and A. Verma, "Cyber Physical Model for the Application of Distributed Building Energy Management System," 2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 2019, pp. 312-317
- [20] Jianhua Wang, Wanxing Sheng, Changkai Shi, Qing Duan, Lijun Qiu and Zhen Li, "Fully Flexible Power Distribution System for the next generation distribution grid," IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016, pp. 3854-3859, doi: 10.1109/IECON.2016.7793655
- [21] Yuhang Zhang, Ming Ni, Yonghui Sun. Fully Distributed Economic Dispatch for Cyber-Physical Power System with Time Delays and Channel Noises. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021. Publisher: SGEPRI.
- [22] N. Metchkarski, R. Stanev and A. Tzolov, "Information and Communication Technologies Potential for Future Power Systems Control," 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/BulEF48056.2019.9030729
- [23] Hong Zhu, Bing Xia, Dongxu Zhou, Ming Zhang, Zhoujun Ma. Research on Integrated Model and Interactive Influence of Energy Internet Cyber Physical System. *Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*. 2020. Publisher: IEEE.
- [24] Y. Wang, D. Liu, X. Xu and H. Dai, "Cyber-physical Power System Modeling for Timing-driven Control of Active Distribution Network," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 549-556, May 2020, doi: 10.35833/MPCE.2018.000191
- [25] Q. Shan and F. Teng, "Topology Reconfiguration for Cyber-physical Energy System with Multi-source Interference," 2019 Chinese Control Conference (CCC), 2019, pp. 7422-7426, doi: 10.23919/ChiCC.2019.8865287
- [26] A. Kummerow, S. Nicolai, C. Brosinsky, D. Westermann, A. Naumann and M. Richter, "Digital-Twin based Services for advanced Monitoring and Control of future power systems," 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9354468
- [27] Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П., Массель Л.В., Новиков Д.А., Райков А.Н., Сендеров С.М., Стенников В.А. Проблемы развития цифровой энергетики в России // *Проблемы управления*. 2019. № 1. С. 2-14.
- [28] Закарюкин В.П., Крюков А.В. *Сложносимметричные режимы электрических систем*. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
- [29] Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid) / Г.О. Арсентьев, Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков [и др.] / Под редакцией А.В. Крюкова. Иркутск : ИрГУПС, 2019. 414 с.
- [30] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. *Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии*. Иркутск: ИрГТУ, 2015. 218 с.
- [31] Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. *Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление*. Ангарск: АГТУ, 2018. 382 с.
- [32] Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. *Контроль остаточного ресурса тяговых трансформаторов* // *Вестник ИрГТУ*. 2010. № 3. С. 104-110.
- [33] *Определение параметров элементов электроэнергетических систем по данным измерений* / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.А. Кушов [и др.]. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 184 с.
- [34] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Вторушин Д.П. *Моделирование систем внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока*. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 161 с.
- [35] Ададуров С.Е., Розенберг Е.Н., Розенберг И.Н. *Оптимизация управления инфраструктурой на основе спутниковых технологий* // *Автоматика, связь, информатика*. 2009. № 9. С. 4-5.
- [36] *Высокоскоростной железнодорожный транспорт: общий курс: в 2 т.* / И.П. Кисилев, Л.С. Бражко, А.Т. Бурков [и др.]. Т.1. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 308 с.
- [37] Чаусов И.С., Холкин Д.В., Бурдин И.А. *Архитектура интернета энергии (IDEA)* // *Энергоэксперт*. 2019. № 4. С. 28–31.