

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2026-2-37-43

Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей 50 кВ на трубопроводы

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2b}, А.В. Черепанов^{2c}, А.Е. Крюков^{3d}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@mail.ru,

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 01.05.2026, принята 20.05.2026

Цель представленных в статье исследований состояла в разработке уточнённой методики моделирования электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей (ТС) 50 кВ на металлические трубопроводы (МТ). Практическая реализация ТС 50 кВ позволяет заметно снизить потери электроэнергии, увеличить протяжённость межподстанционных зон и сократить число тяговых подстанций. Кроме того, на этой основе может быть достигнуто примерно двукратное возрастание провозной способности железнодорожной магистрали. Компьютерные модели для вычисления ЭМВ реализованы в программном комплексе Fazonord AC-DC. Задача определения ЭМВ ТС 50 кВ на МТ важна для двух масштабных инфраструктурных отраслей – электроэнергетики и трубопроводного транспорта. Сближение трасс этих объектов, обусловленное едиными географическими коридорами, порождает серьёзные проблемы электромагнитной безопасности и совместимости. Вследствие значительных тяговых нагрузок, создаваемых движением поездов весом 4384 тонны в нечётном направлении и массой 6780 т в чётном с интервалом в 40 минут, на трубопроводе возникают наведённые напряжения (НН), максимальные уровни которых значительно превышают допустимую по условиям безопасности величину в 60 В. Указанные НН могут также вызывать повышенную электрохимическую коррозию металла сооружения. Для снижения НН могут применяться следующие мероприятия: увеличение расстояния между ТС 50 кВ и МТ; установка дополнительных заземлений; монтаж экранирующих проводников рядом с МТ; применение активных компенсаторов наведённых напряжений. Разработанные компьютерные модели могут использоваться в практике проектирования и эксплуатации ТС и МТ, проходящих в смежных коридорах; при этом, кроме параллельных участков, можно учитывать траектории сближения любой сложности.

Ключевые слова: тяговые сети 50 кВ; электромагнитные влияния на трубопровод; наведённые напряжения; моделирование.

Modeling the electromagnetic effects of 50 kV traction networks on pipelines

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2b}, A.V. Cherepanov^{2c}, A.E. Kryukov^{3d}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru, ^d appleforevor@mail.ru,

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 01.05.2026, accepted 20.05.2026

The objective of the research presented in the article is to develop a refined methodology for modeling the electromagnetic effects of 50 kV traction networks on metal pipelines. Practical implementation of 50 kV networks allows for a significant reduction in power losses, an increase in the length of inter-substation zones, and a reduction in the number of traction substations. Furthermore, this approach can lead to an approximately twofold increase in the carrying capacity of a railway line. Computer models for calculating electromagnetic effects are implemented in the Fazonord AC-DC software package. Determining the electromagnetic effects of 50 kV traction networks on pipelines is important for two large-scale infrastructure sectors: electric power and pipeline transportation. The convergence of these facilities' routes, due to common geographic corridors, creates serious problems of electromagnetic safety and compatibility. Due to the significant traction loads generated by the movement of trains weighing 4,384 t in the odd direction and 6,780 tons in the odd direction, with intervals of 40 minutes, induced voltages arise on the pipeline, the maximum levels of which significantly exceed the 60 V safety limit. These voltages can also cause increased electrochemical corrosion of the structure's metal. The following measures can be taken to reduce induced voltages: increasing the distance between the 50 kV traction network and the pipeline; installing additional grounding; installing shielding conductors near the pipeline; and using active induced voltage compensators. The developed computer models can be used

in the design and operation of traction networks and pipelines running in adjacent corridors. Moreover, in addition to parallel sections, approach trajectories of any complexity can be considered.

Keywords: 50 kV traction networks; electromagnetic influences on pipelines; induced voltages; modeling.

Введение и обзор литературы. Задача повышения энергетической эффективности систем тягового электроснабжения может быть решена путём повышения напряжения в тяговой сети (ТС) [1]. В частности, использование ТС 50 кВ позволяет заметно снизить потери электроэнергии, увеличить протяжённость межподстанционных зон и сократить число тяговых подстанций. Кроме того, на этой основе может быть достигнуто примерно двукратное возрастание провозной способности железнодорожной магистрали [1]. Однако, в современных условиях практическому применению систем тягового электроснабжения (СТЭ) 50 кВ должно предшествовать детальное компьютерное моделирование на базе адекватных алгоритмов, учитывающих все влияющие факторы. В настоящее время вопросам разработки компьютерных моделей СТЭ уделяется повышенное внимание. Так, например, модель системы тягового электроснабжения и методы управления скоростью поезда рассмотрены в [2]. Авторами предложен новый регулятор скорости на основе нейронной сети и ПИД-закона. Модель, разработанная в MATLAB/Simulink, состоит из трёх основных частей: тяговая сеть, электровоз и нагрузка. Модель электровоза описывает тяговый двигатель с учётом связи механических и электрических частей. ПИД-регулятор используется из-за его способности к самоадаптации. Для демонстрации устойчивости предложенного подхода представлен пример исследования реального участка системы тягового электроснабжения. Результаты расчётов потоков мощности в СТЭ с помощью итерационного метода представлены в [3]. Показано, что в связи с быстрым развитием электрифицированных железных дорог значительно возрастает нагрузка на оборудование, что приводит к частым сбоям в его работе. Это указывает на необходимость разработки нового алгоритма определения потокораспределения для обеспечения надёжной работы железной дороги. На основе топологии тяговой сети построена её цепная модель и предложен новый итерационный метод решения задачи расчёта потокораспределения. Результаты моделирования показали, что время решения сократилось на 16 %, а точность вычислений повысилась на 4 %. Эксперименты подтвердили эффективность модели и обеспечили надёжную основу для последующего проектирования СТЭ.

Математическая модель СТЭ переменного тока предложена в [4]. На основе анализа многопроводной линии электропередачи построена модель ТС, применимая для различных режимов. Кроме того, реализованы модели 24-импульсного выпрямительного преобразователя, ТС и силовой машины для определения режимов СТЭ метрополитена. Проведено моделирование в различных рабочих условиях. Расчёты показали, что модель обладает высокой точностью и подходит для моделирования СТЭ высокоскоростных электрифицированных железных дорог. Вопросы моделирования СТЭ на основе усовершенствованного цифрового симулятора энергосистемы ADPSS (Advanced Digital Power System Simulator) рассмотрены в [5]. Показано, что в связи

с быстрым развитием электрифицированных железных дорог доля тяговой нагрузки в электроэнергетических системах (ЭЭС) постоянно растёт, а её влияние на качество электроэнергии становится всё более значительным. На основе ADPSS построена крупномасштабная модель для определения режима ЭЭС с учётом СТЭ. Результаты моделирования позволяют проводить анализ качества электроэнергии.

Результаты расчётов переходных процессов при коротких замыканиях в тяговых сетях постоянного тока представлены в [6]. Авторами выполнен подробный анализ переходных процессов, наблюдаемых при коротких замыканиях (КЗ) в ТС городского транспорта. Разработана модель, которая служит основой для анализа этих явлений. Приведены конкретные рекомендации по улучшению настроек релейной защиты, позволяющие повысить избирательность и эффективность. Физическая модель ТС переменного тока для определения аварийных режимов описана в [7]. Она позволяет рассчитывать токи КЗ на разных расстояниях от тяговой подстанции (ТП).

Результаты моделирования инновационной СТЭ на основе кабелей и анализа распределения электроэнергии приведены в [8]. Для создания расчёта потоков мощности, связанных с взаимодействием поезда и сети, создана сетевая модель каждого компонента СТЭ. На этой основе построена эквивалентная модель системы. Проведённые исследования показали, что предложенная модель позволяет точно рассчитывать режимы и решать вопросы по снижению мощностей тяговых трансформаторов.

Анализ процессов в СТЭ при КЗ проведён в [9]. Для оценки способности СТЭ работать после сбоя, вызванного воздействием КЗ, предложена концепция восстановления. Введены показатели такой оценки: скорость восстановления тяговой нагрузки и электропитания, а также ожидаемое время начала работы после сбоя. Результаты моделирования в Matlab подтвердили, что данные показатели позволяют адекватно оценить способность СТЭ к восстановлению после сбоя.

Результаты анализа несбалансированных режимов электрической сети, питающей тяговые нагрузки, представлены в [10]. Для расчёта установившихся режимов применялась математическая модель, использующая фазовые переменные. Показано влияние несимметричного режима на потери активной мощности. Рассмотрен способ симметрирования на базе трансформатора Скотта.

Исследование гармонических характеристик ТС проведено в [11]. Рассмотрены режимы электропитания с учётом высших гармоник (ВГ) в ТС, вызванных смешанным движением электровозов переменного и постоянного тока. Создана интерактивная модель взаимодействия между транспортными средствами и тяговой сетью с использованием программного обеспечения Matlab/Simulink. С помощью анализа ВГ электровозов подтверждена корректность сформулированных выводов. Проведены сравнительные исследования и анализ

гармонических характеристик ТС при различной длине её участков и расположении локомотивов, а также отличающихся условиях их работы. Результаты исследования показали, что интерактивная модель точно отражает влияние смешанного режима работы локомотивов переменного и постоянного тока на гармонические характеристики тяговой электрической сети.

Анализ низкочастотных колебаний несимметричной СТЭ, подключенной к электросети, проведён в [12]. Проведено исследование взаимодействия между ТС и питающими электросетями. Корректность теоретических выводов проверена с помощью моделирования в MATLAB/Simulink. Анализ импеданса короткого замыкания в ТС переменного тока выполнен в [13]. Показано, что на высокоскоростных железных дорогах Китая применяется режим электроснабжения с использованием автотрансформаторов (АТ). В случае отключения тяговой подстанции ТС должна перейти в режим работы с перекрытием зоны питания. Для обеспечения надёжной работы СТЭ в этих условиях необходимо проанализировать импеданс КЗ. Построена схема ТС с перекрестной связью и получена зависимость импеданса КЗ от расстояния. Предложены способы улучшения настройки дистанционной защиты.

Результаты проектирования конструкции усовершенствованной СТЭ дальнего действия и стратегия её оптимального управления описаны в [14]. Предложена СТЭ, которая позволяет увеличить дальность ТС более чем в шесть раз по сравнению с традиционной системой. Она обеспечивает надёжное электроснабжение на больших расстояниях. Работоспособность предлагаемой СТЭ подтверждена с помощью моделирования. Задача определения места повреждения в ТС со станционным депо решена в [15]. При возникновении повреждения в двухпутной тяговой сети использование параметров для однопутного повреждения приводит к большой ошибке определения места КЗ. Авторами проанализирована схема двухпутной ТС со станционным депо. Выявлены причины неточности метода определения места КЗ и предложены способы его улучшения. Точность проверена на основе модели в Matlab/Simulink.

Задачи анализа низкочастотных электромагнитных полей (ЭМП) и расчёта наведённых напряжений в подземном трубопроводе решены в [16]. Авторами выполнены расчёты ЭМП вблизи ТС 25 кВ. Представлен метод определения наведённых напряжений (НН) на подземный газопровод от ТС 25 кВ в случае короткого замыкания. Расчёты выполнены с помощью программного обеспечения EMTP-АТР. Предложены возможные меры по снижению НН. Вопросы моделирования СТЭ на основе измерений рассмотрены в [17]. Для решения проблемы учёта тяговых нагрузок при моделировании на основе измерений использовался метод классификации и синтеза динамических характеристик. Представлена новая модель нагрузки, основанная на её фактической структуре. Расчёты подтвердили её эффективность. Результаты исследования динамической устойчивости ЭЭС с учётом модели тяговой нагрузки представлены в [18]. Показано, что тяговые нагрузки оказывают опасные воздействия на качество электроэнергии. С помощью программного пакета PSASP/UIP была создана

модель тяговой нагрузки на основе измерений для анализа динамической устойчивости.

Результаты исследования взаимодействия между ЭЭС и СТЭ приведены в [19]. Проведено комплексное тестирование качества электроэнергии в типичной ЭЭС с наличием тяговой нагрузки. Проанализировано взаимодействие между ЭЭС и СТЭ и с помощью моделирования в PSCAD/EMTDC предложены способы улучшения качества электроэнергии. Результаты моделирования показали, что установка управляемых источников реактивной мощности на ТП снижает уровень гармоник и несимметрию трёхфазного напряжения. Исследование возможностей улучшения электропитания тяговых электродвигателей проведено в [20]. Реализована модель СТЭ, включающая ТП и подстанцию с АТ, и проведён расчёт потоков мощности в различных режимах. Анализ гармоник в СТЭ при колебаниях нагрузки выполнен в [21]. Рассмотрены проблемы с ВГ, вызванные колебаниями нагрузки, включая процессы пуска и торможения электровозов. Создана модель электровоза и СТЭ. Результаты моделирования показали, что гармоники, вызванные колебаниями нагрузки, оказывают значительное влияние на сети ЭЭС. Проведённые исследования создают теоретическую основу для оптимизации управления гармониками в СТЭ.

Анализ описанных публикаций позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрены важные аспекты, связанные с разработкой методов и алгоритмов моделирования СТЭ. Для определения режимов СТЭ в основном используются средства общего назначения, например, Matlab/Simulink; EMTP-АТР, PSCAD, однако специализированные программные комплексы, позволяющие наиболее адекватно учитывать специфику СТЭ, в рассмотренных публикациях не применяются. Кроме того, в рассмотренных выше работах задача моделирования перспективных СТЭ 50 кВ решения не получила.

Для моделирования СТЭ повышенного напряжения можно эффективно применять методы и алгоритмы определения режимов электроэнергетических систем в фазных координатах и промышленный программный комплекс Fazonord AC-DC [22, 23]. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей для вычисления электромагнитных влияний тяговых сетей 50 кВ на трубопроводы.

Результаты моделирования. Задача определения ЭМВ ТС 50 кВ на МТ важна для двух масштабных инфраструктурных отраслей – электроэнергетики и трубопроводного транспорта. Сближение трасс этих объектов, обусловленное едиными географическими коридорами, порождает серьёзные проблемы электромагнитной безопасности и совместимости. Моделирование проведено для перспективной СТЭ 50 кВ с межподстанционными зонами протяжённостью в 80 км, фрагмент схемы которой показан на рис. 1, а. Траектория параллельного сближения ТС и МТ, заземлённого по краям зоны совместной прокладки, проиллюстрирована на рис. 1, б.

Результаты моделирования ЭМВ в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC представлены на рис. 2–6. На рис. 2 приведены графики зависимостей от времени напряжений основной частоты U_1 , наведённых на МТ вследствие электромагнитных влияний ТС

50 кВ, а также суммарных коэффициентов k_U гармонических составляющих НН. На рис. 3 показаны аналогичные зависимости для эффективных значений НН высших гармоник, а также результирующих НН, рассчитан-

ных с учётом ВГ. На рис. 4 и 5 приведены диаграммы перечисленных выше параметров, построенные в зависимости от координаты x (рис. 1, а). Сравнительные графики НН показаны на рис. 6.

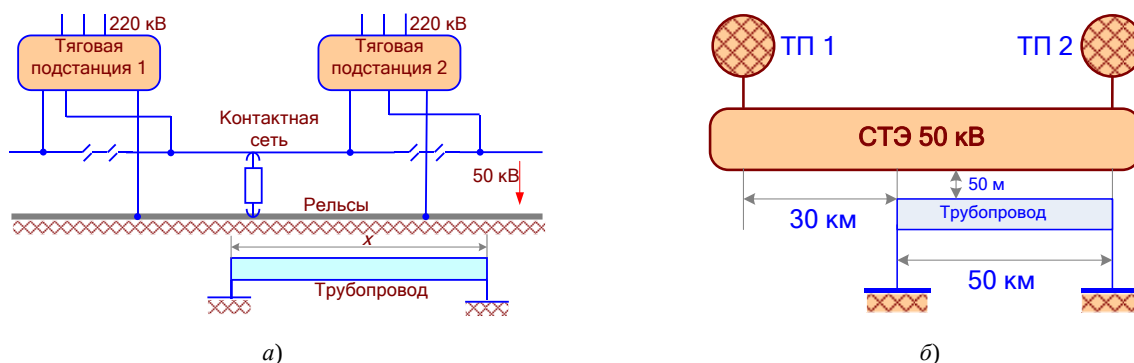


Рис. 1. Фрагмент схемы СТЭ 50 кВ (а) и траектории сближения ТС и МТ (б)

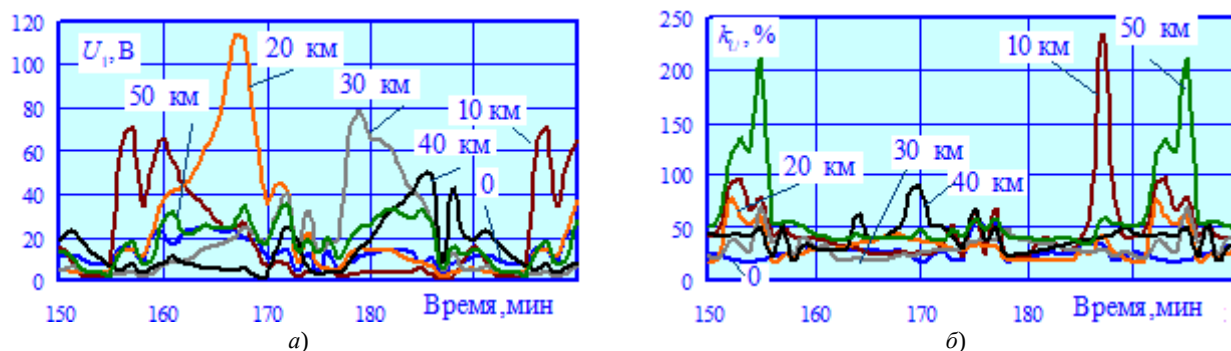


Рис. 2. Зависимости $U_1 = U_1(t)$ (а) и $k_U = k_U(t)$ (б); цифры на графиках соответствуют координатам точек, отвечающих местам определения НН

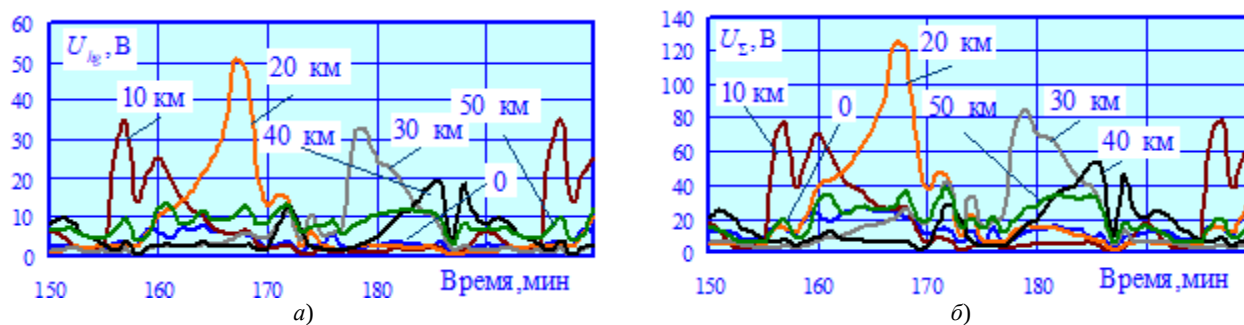


Рис. 3. Зависимости $U_{hg} = U_{hg}(t)$ (а) и $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$ (б)

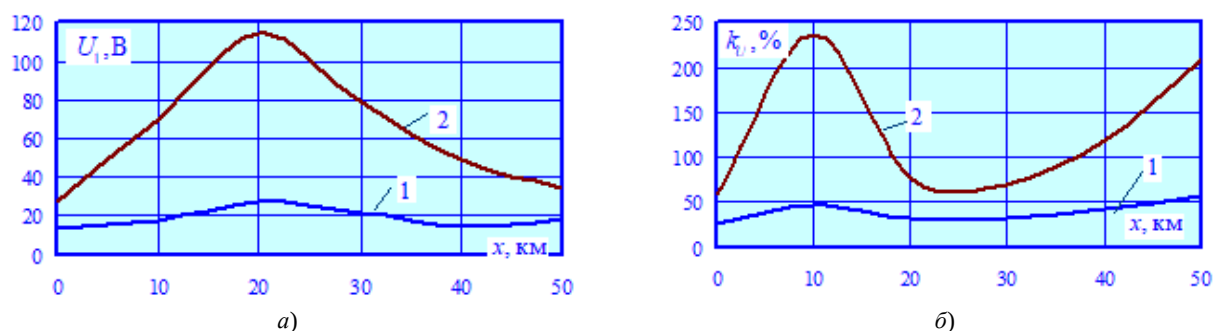


Рис. 4. Зависимости $U_1 = U_1(x)$ (а) и $k_U = k_U(x)$ (б): U_1 – НН основной частоты; k_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих; 1 – средние значения; 2 – максимумы

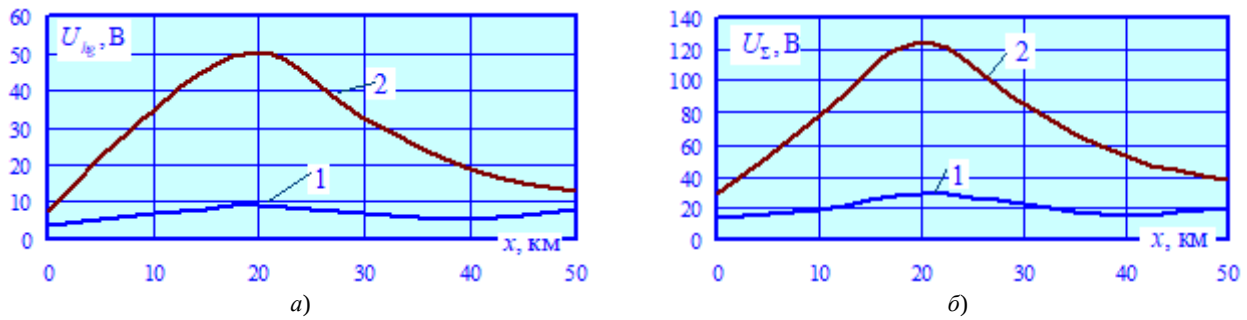


Рис. 5. Зависимости $U_{hg} = U_{hg}(x)$ (а) и $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(x)$ (б): U_{hg} – эффективные значения НН высших гармоник; U_{Σ} – результирующие НН; 1 – средние значения; 2 – максимумы

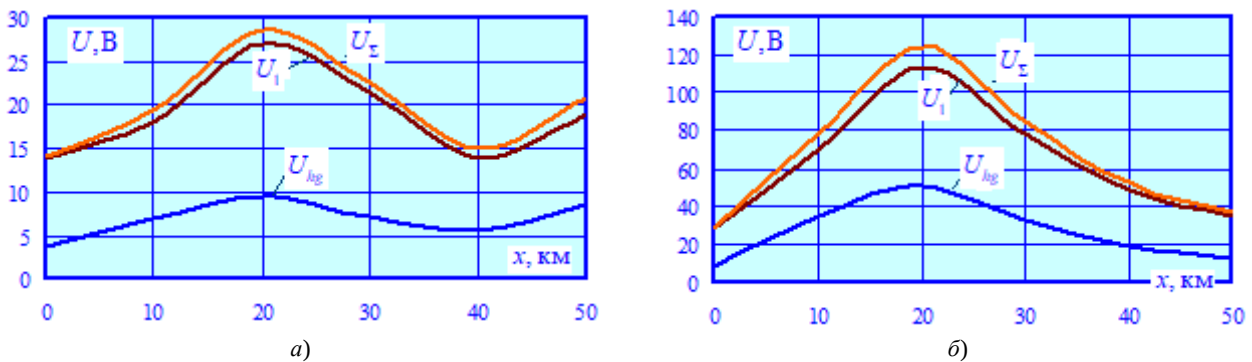


Рис. 6. Зависимости $U_1 = U_1(x)$, $U_{hg} = U_{hg}(x)$ и $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(x)$: а – средние значения; б – максимумы

На основе анализа представленных на рис. 2–6 результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Вследствие значительных тяговых нагрузок, создаваемых движением поездов весом 4384 т в нечётном направлении и массой 6780 т в чётном, с интервалом в 40 минут на трубопроводе возникают наведённые напряжения, максимальные уровни которых значительно превышают допустимую по условиям безопасности величину в 60 В [24].

2. Указанные НН могут также вызывать повышенную электрохимическую коррозию металла сооружения.

3. Для снижения НН могут применяться следующие мероприятия: увеличение расстояния между ТС 50 кВ

и МТ; установка дополнительных заземлений; монтаж экранирующих проводников рядом с МТ; применение активных компенсаторов наведенных напряжений.

4. Разработанные компьютерные модели могут использоваться в практике проектирования и эксплуатации ТС и МТ, проходящих в смежных коридорах: при этом, кроме параллельных участков можно учитывать траектории сближения любой сложности.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Литература

1. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. М.: Интекст, 2002. 104 с.
2. B.R. Ke, H. Maghfiroh, K.L. Lian, N. Chen and D.F. Teshome "Model of traction system and speed control for single train of Taipei mass rapid transit system" 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Banff, AB, Canada, 2016, pp. 781–787, doi: 10.1109/AIM.2016.7576863.
3. Z. Fan, L. Yang, X. Tian, H. Dong and Y. Ma "Power Flow Analysis of Traction Power Supply System Based on Multi-Iteration Method" 2023 IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Ningbo, China, 2023, pp. 1534–1539, doi: 10.1109/ICIEA58696.2023.10241885.
4. X. Yu "General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research" 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), Dalian, China, 2020, pp. 441–446, doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194938.
5. L. Sun, X. Zhang, M. Liu and H. Peng "Modeling and influence research of traction power supply system based on ADPSS" 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014, pp. 193–198, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993576.
6. T. Lalev and V. Dimitrov "Analysis of Transient Processes During Short-Circuits in DC Traction Networks for Urban Transport" 2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2024, pp. 1–4, doi: 10.1109/BulEF63204.2024.10794841.
7. I. Angelov "Physical Model of AC Traction Networks for Simulating Emergency Modes" 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10021200.
8. L. Zhang, S. Liang, X. Li and Y. Jia, «Modelling on Novel Cable Traction Power Supply System and Power Distribution Analysis» in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 745–754, April 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3069980.

9. P. Luo, Q. Han and Q. Guo "Analysis and Evaluation of Elastic Restoring Force of Traction Power Supply System under Short Circuit Conditions" 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983249.
10. U. Bumtsend, M. Safaraliev, A. Ghulomzoda, B. Ghoziev, J. Ahyoev and G. Ghulomabdolov "The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network" 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russia, 2020, pp. 0456–0459, doi: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117758.
11. Q. Nie, M. Tian, L. Sun and H. Wang, "The Simulation Comparative Study of Traction Network Harmonic Characteristic of Three Kinds of AT Power Supply modes," 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021, pp. 1483–1491, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437023.
12. M. Chang, X. Wang, X. Lv and R. Kong, "Modeling and Low-Frequency Oscillation Analysis of an Asymmetrical Traction Power System Connected to Power Grid" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, no. 1, pp. 1750–1764, March 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3200994.
13. S. Zhang, G. Lin and Y. Li "Short Circuit Impedance Analysis for Cross-Coupling AT Power Traction Network Under Over-zone Feeding Operation Condition" 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), Chengdu, China, 2021, pp. 1–7, doi: 10.1109/CIYCEE53554.2021.9676975.
14. D. Kang, J. Xu and X. He "Structure Scheme and Control Strategy Design of Advanced Traction Power Supply System" 2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Chengdu, China, 2022, pp. 69–74, doi: 10.1109/ICIEA54703.2022.10006325.
15. B. Hong and G. Lin "Fault Location for Power Supply Traction Network with Station Yard of Double-track Electrified Railway" 2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), Wuhan, China, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/CIYCEE55749.2022.9959027.
16. B. Milesevic, B. Filipovic-Grcic and T. Radosevic "Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline" Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), Leiria, Portugal, 2011, pp. 1–7.
17. Y. Zhang, R. Chen, Y. Xiao, W. Zhao, X. Li and G. Zhang, "Measurement-based modeling of traction power supply system" 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China, 2011, pp. 946–950, doi: 10.1109/APAP.2011.6180727.
18. J. Li, X. Li, W. Deng, Z. Xu, Q. Liu and Y. Zhang "Study on power systems transient stability considering traction power supply system measurement-based load model" 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China, 2011, pp. 1430–1434, doi: 10.1109/APAP.2011.6180597.
19. Wang et al. "The interaction research between public grid and traction power supply system" 2008 China International Conference on Electricity Distribution, Guangzhou, China, 2008, pp. 1–8, doi: 10.1109/CICED.2008.5211744.
20. Z. Fan, X. Tian, X. Sun, X. Yang, H. Zhang and Z. Tan, "Research on Modeling and Power Supply Capability of AT Traction Power Supply System" 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA), Guangzhou, China, 2021, pp. 186–189, doi: 10.1109/AIEA53260.2021.00047.
21. Bo Yang, Yutong Wu, Chen Wang, Yang Li, Guoli Song, Xuanyu Zhang, Zhenkun Sun, Jiawen Huang. Harmonic Analysis and its Application in Traction Power Supply System Under Load Fluctuations. 11th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA). 2024, pp. 598–602.
22. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск. 2005. 273 с.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.
24. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. 80 p

References

1. Kotelnikov A.V. Electrification of Railways. World Trends and Prospects. Moscow: Intext, 2002, 104 p.
2. B.R. Ke, H. Maghfiroh, K.L. Lian, N. Chen and D.F. Teshome "Model of traction system and speed control for single train of Taipei mass rapid transit system" 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Banff, AB, Canada, 2016, pp. 781–787, doi: 10.1109/AIM.2016.7576863.
3. Z. Fan, L. Yang, X. Tian, H. Dong and Y. Ma "Power Flow Analysis of Traction Power Supply System Based on Multi-Iteration Method" 2023 IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Ningbo, China, 2023, pp. 1534–539, doi: 10.1109/ICIEA58696.2023.10241885.
4. X. Yu "General Mathematical Model of AC Traction Power Supply System Simulation Based on Mathematical Reasoning and Its Application Research" 020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), Dalian, China, 2020, pp. 441–446, doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194938.
5. L. Sun, X. Zhang, M. Liu and H. Peng "Modeling and influence research of traction power supply system based on ADPSS" 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014, pp. 193–198, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993576.
6. T. Lalev and V. Dimitrov "Analysis of Transient Processes During Short-Circuits in DC Traction Networks for Urban Transport" 2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2024, pp. 1–4, doi: 10.1109/BulEF63204.2024.10794841.
7. I. Angelov "Physical Model of AC Traction Networks for Simulating Emergency Modes" 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10021200.
8. L. Zhang, S. Liang, X. Li and Y. Jia. "Modelling on Novel Cable Traction Power Supply System and Power Distribution Analysis" in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 745–754, April 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3069980.
9. P. Luo, Q. Han and Q. Guo "Analysis and Evaluation of Elastic Restoring Force of Traction Power Supply System under Short Circuit Conditions" 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983249.
10. U. Bumtsend, M. Safaraliev, A. Ghulomzoda, B. Ghoziev, J. Ahyoev and G. Ghulomabdolov "The Unbalanced Modes Analyze Of Traction Loads Network" 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russia, 2020, pp. 0456–459, doi: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117758.
11. Q. Nie, M. Tian, L. Sun and H. Wang, "The Simulation Comparative Study of Traction Network Harmonic Characteristic of Three Kinds of AT Power Supply modes" 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021, pp. 1483–1491, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437023.
12. M. Chang, X. Wang, X. Lv and R. Kong "Modeling and Low-Frequency Oscillation Analysis of an Asymmetrical Traction Power System Connected to Power Grid" in IEEE Transactions

- on Transportation Electrification, vol. 9, no. 1, pp. 1750–1764, March 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3200994.
13. S. Zhang, G. Lin and Y. Li "Short Circuit Impedance Analysis for Cross-Coupling AT Power Traction Network Under Over-zone Feeding Operation Condition" 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIY-CEE), Chengdu, China, 2021, pp. 1–7, doi: 10.1109/CIY-CEE53554.2021.9676975.
14. D. Kang, J. Xu and X. He "Structure Scheme and Control Strategy Design of Advanced Traction Power Supply System" 2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Chengdu, China, 2022, pp. 69–74, doi: 10.1109/ICIEA54703.2022.10006325.
15. B. Hong and G. Lin «"ault Location for Power Supply Traction Network with Station Yard of Double-track Electrified Railway" 2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), Wuhan, China, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/CIYCEE55749.2022.9959027.
16. B. Milesevic, B. Filipovic-Grcic and T. Radosevic "Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline" Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), Leiria, Portugal, 2011, pp. 1–7.
17. Y. Zhang, R. Chen, Y. Xiao, W. Zhao, X. Li and G. Zhang, "Measurement-based modeling of traction power supply system»"2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China, 2011, pp. 946–950, doi: 10.1109/APAP.2011.6180727.
18. J. Li, X. Li, W. Deng, Z. Xu, Q. Liu and Y. Zhang "Study on power systems transient stability considering traction power supply system measurement-based load model" 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China, 2011, pp. 1430–1434, doi: 10.1109/APAP.2011.6180597.
19. Wang et al. "The interaction research between public grid and traction power supply system" 2008 China International Conference on Electricity Distribution, Guangzhou, China, 2008, pp. 1–8, doi: 10.1109/CICED.2008.5211744.
20. Z. Fan, X. Tian, X. Sun, X. Yang, H. Zhang and Z. Tan "Research on Modeling and Power Supply Capability of AT Traction Power Supply System" 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA), Guangzhou, China, 2021, pp. 186–189, doi: 10.1109/AIEA53260.2021.00047.
21. Bo Yang, Yutong Wu, Chen Wang, Yang Li, Guoli Song, Xuanyu Zhang, Zhenkun Sun, Jiawen Huang. Harmonic Analysis and its Application in Traction Power Supply System Under Load Fluctuations. 11th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA). 2024, pp.598-602.
22. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk. 2005. 273 p.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 156 p.
24. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. 80 p.