

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2025-4-41-48

Учёт влияния трубопроводов на электромагнитные поля тяговых сетей

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2b}, Е.В. Воронина^{2c}, А.Е. Крюков^{3d}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c eka7erina.voronina@yandex.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/0009-0008-4399-6086>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>.

Статья поступила 15.09.2025, принята 07.10.2025.

Основная цель представленных в статье исследований, заключалась в создании моделей для точного расчёта электромагнитных полей (ЭМП), учитывающего высшие гармоники и влияние проложенных параллельно железной дороге (ЖД) металлических трубопроводов. Это связано с тем, что объекты электрифицированных ЖД являются мощными источниками ЭМП, оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье персонала, экологическую обстановку и надёжность работы электронного оборудования. Регулярное воздействие ЭМП влияет на природные экосистемы, при этом практически во всех их компонентах проявляются негативные эффекты. В процессе разработки использовалась концепция описания системы тягового электроснабжения (СТЭ) в фазных координатах, реализованная в программном продукте Fazonord AC-DC. Результаты вычислительных экспериментов продемонстрировали, что наличие трубопровода увеличивает напряжённость магнитного поля (МП) в непосредственной близости от трубопровода более чем в пять раз, а электрические поля повышаются примерно на 6 %. Максимальный рост напряжённости МП наблюдается непосредственно над трубопроводом, что потенциально опасно для чувствительного диагностического оборудования и приборов электрохимической защиты. По итогам проведённой работы были созданы методики, алгоритмы и компьютерные модели СТЭ, позволяющие точно оценивать напряжённости ЭМП с учётом высших гармоник (ВГ) и наличия металлических трубопроводов, искажающих их пространственное распределение. Научную новизну полученных результатов определяют следующие положения: при расчётах ЭМП использовались реальные профили пути для моделирования режимов работы, а также определялись смеси ЭМП, образованные составляющими основной частоты и ВГ до 39 включительно. Разработанные модели могут эффективно применяться на практике при выборе наиболее рациональных мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности в тяговых сетях, находящихся вблизи протяжённых металлических объектов.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения; электромагнитные поля; высшие гармоники; трубопроводы; моделирование.

Consideration of the influence of pipelines on the electromagnetic fields of traction networks

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2b}, E.V. Voronina^{2c}, A.E. Kryukov^{3d}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c eka7erina.voronina@yandex.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/0009-0008-4399-6086>, ^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>.

Received 15.09.2025, accepted 07.10.2025

The main purpose of the research presented in the article is to create models for the accurate calculation of electromagnetic fields (EMF), taking into account the higher harmonics and the influence of metal pipelines laid parallel to the railway. This is due to the fact that electrified railway facilities are powerful sources of electromagnetic radiation, which adversely affect the health of personnel, the environmental situation and the reliability of electronic equipment. Regular exposure to EMF affects natural ecosystems, with almost all their components showing negative effects. During the development process, the concept of describing the traction power supply system (TPSS) in phase coordinates, implemented in the Fazonord AC-DC software product, is used. The results of computational experiments have shown that the presence of a pipeline increases the strength of the magnetic field (MF) in the immediate vicinity of the pipeline by more than five times, and electric fields increase by about 6 %. The maximum increase in MF voltage is observed directly above the pipeline, which is potentially dangerous for sensitive diagnostic equipment and electrochemical protection devices. Based on the results of the work carried out, methods, algorithms and computer models of TPSS are created that make it possible to accurately assess the EMF

intensity, taking into account the higher harmonics (HH) and the presence of metal pipelines that distort their spatial distribution. The scientific novelty of the results obtained is determined by the following provisions: when calculating the EMF, real path profiles are used to simulate operating modes, and mixtures of EMF formed by the components of the fundamental frequency and HH up to and including 39 are determined. The developed models can be effectively applied in practice when choosing the most rational measures to ensure electromagnetic safety in traction networks located near extended metal objects.

Keywords: traction power supply systems; electromagnetic fields; higher harmonics; pipelines; modeling.

Введение. Объекты электрифицированных железных дорог являются мощными источниками электромагнитных полей (ЭМП), оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье персонала, экологическую обстановку и работоспособность электронного оборудования. При длительном влиянии таких полей могут возникать негативные эффекты во всех важных системах человеческого организма. Кроме того, на регулярное воздействие ЭМП реагируют биоценозы, во всех компонентах которых возникают негативные проявления.

В связи с ростом электропотребления интенсивность перечисленных воздействий возрастает. Поэтому проблема их уменьшения приобретает особую актуальность. В современных условиях выбор методов и средств уменьшения напряженностей ЭМП должен осуществляться с использованием компьютерного моделирования на основе адекватных моделей, учитывающих все влияющие факторы. Один из таких факторов состоит в возможности прокладки вблизи железной дороги металлических трубопроводов, заметно влияющих на характер распределения напряженностей ЭМП в пространстве. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей, позволяющих адекватно учитывать наличие трубопроводов при определении ЭМП, создаваемых тяговыми сетями (ТС).

Обзор литературы и постановка задачи. Задача определения напряженностей ЭМП вблизи высоковольтных и многоамперных объектов электрификации железных дорог имеет несомненную актуальность, что подтверждается большим числом публикаций, посвященных данной тематике. Так, например, вопросы влияния ЭМП контактной сети на высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП), связанные с необходимостью учёта особенностей распространения ЭМП близи железнодорожной инфраструктуры, рассмотрены в [1]. В работах [2, 3] детально проанализировано воздействие ЭМП, создаваемых ТС переменного тока, на световоды. Было установлено, что электрическое поле (ЭП) оказывает влияние посредством эффекта Керра, а магнитное – через эффект Фарадея.

Результаты исследования ЭМП на железной дороге переменного тока приведены в [4]. Проведён сравнительный анализ методов расчёта напряженностей, выявлены их достоинства и недостатки. Подчёркнута значимость совершенствования технологий защиты от воздействия ЭМП ТС. В обзоре, опубликованном в [5], проведён анализ публикаций, посвящённых изучению влияния ЭМП, создаваемых ТС, на персонал и электротехническое оборудование. Показана необходимость комплексного подхода к решению проблем, связанных с негативным влиянием ЭМП, а также расширение исследований в этом направлении.

Вопросы применения ЭМП, создаваемых ТС, для проведения зондирования земной коры рассмотрены в [6].

Показана перспективность использования естественных источников ЭМП для целей зондирования и подчёркнута важность дальнейших исследований в данной области. Результаты комплексного исследования характеристик техногенных ЭМП ТС представлены в [7]. Приведены результаты полевых испытаний, подтвердивших возможность выделения однородных сигналов, пригодных для применения в электроразведке.

Расчёты напряженностей ЭМП ТС проведены в [8]. Предложены аналитические соотношения для прогнозирования и управления электромагнитной безопасностью. Они будут полезны специалистам, занимающимся защитой от воздействия ЭМП. Анализ ЭМП, формирующегося в окрестностях железнодорожного оборудования, выполнен в [9]. Актуальность этих вопросов связана с высокими уровнями электропотребления и разнообразием источников ЭМП. Показана необходимость углублённого изучения ЭМП и строгого соблюдения принципов электромагнитной совместимости (ЭМС) для обеспечения бесперебойной и безопасной работы систем тягового электроснабжения (СТЭ).

Сравнительный анализ СТЭ и электромагнитных помех в цепи обратного тягового тока представлен в [10]. Он был направлен на выявление основных источников и спектра помех, воздействующих на железнодорожную автоматику. Доказана необходимость улучшения методов их подавления и введения жёстких стандартов для повышения надёжности и безопасности СТЭ. Проблема влияния низкочастотных электромагнитных полей, создаваемых ТС, на подземные металлические трубопроводы рассматривается в [11]. Основной объект исследования – ЭМП, создаваемые ТС 25 кВ. Показана важность решения этой проблемы и рекомендовано внедрение предупредительных мер для продления срока службы трубопроводов и повышения безопасности их эксплуатации.

Характеристики низкочастотной электромагнитной связи между ТС и подземным трубопроводом, заложенным в многослойном грунте, получены в [12]. Показано заметное влияние свойств грунтового массива на возникновение наведённых напряжений. Подчёркнута важность правильного учёта структурных особенностей грунта при проектировании и эксплуатации подземных коммуникаций. Выявлено, что ошибочная трактовка параметров грунта может стать причиной недооценки риска повреждения трубопроводов и возгорания газа. Анализ электромагнитной обстановки в окрестности ТС представлен в [13]. Показано, каким образом нарушения в защите ТС могут повлиять на безопасность эксплуатации и электромагнитные поля. На основе полученных результатов возможно разрабатывать эффективные защитные меры и улучшать проекты железнодорожной инфраструктуры.

Задача ЭМС между многопроводной ТС и высоковольтной ЛЭП 110 кВ, когда их провода подвешены на

общих опорах, решена в [14]. Полученные результаты важны для проектировщиков и эксплуатационного персонала магистралей, где имеются участки совместной подвески ЛЭП и ТС. Доказана возможность успешной реализации проектов по улучшению ЭМС, что положительно скажется на безопасности и эффективности эксплуатации СТЭ. Исследование ЭМП ТС в режиме короткого замыкания (КЗ) проведено в [15]. Короткое замыкание характеризуется появлением сильного импульса тока, представляя собой экстремальную и потенциально опасную ситуацию. На основе полученных результатов дана количественная оценка электромагнитных помех на высокоскоростных магистралях и предложены способы защиты электронных устройств, расположенных вблизи железнодорожных путей. Предложенный метод может применяться для повышения безопасности эксплуатации транспортной инфраструктуры.

Вопросы безопасности пассажиров, находящихся в вагонах скоростных поездов, при дуговых разрядах в ТС рассмотрены в [16]. Чтобы оценить влияние дугового разряда на пассажиров, применялось компьютерное моделирование. Полученные результаты показали, что ЭМП в вагоне поезда, обусловленное колебаниями напряжения в контактной сети при наличии дуговых разрядов, не влияет на здоровье пассажиров, что важно учитывать при оценке безопасности высокоскоростных железных дорог. Компьютерная оценка влияния ЭМП ТС на смежные ЛЭП получена в [17]. Подчеркнута значимость точного прогнозирования данного явления и указаны потенциальные экономические последствия ошибок в расчётах, приводящие к значительному увеличению затрат на электрификацию. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность современных конструкций ТС, оснащённых усиливающими и экранирующими проводами для обеспечения электромагнитной совместимости.

Модель распространения сигналов для количественного анализа ЭМП, генерируемого высокоскоростными железными дорогами, предложена в [18]. Детально описан метод расчёта характеристик ближней зоны, играющей ключевую роль в распространении низкочастотных колебаний, исследованы параметры излучателя и типы используемых приёмных антенн. Проведено численное моделирование процесса распространения ЭМП с последующим сравнением полученных результатов с ранее разработанными моделями распространения.

Методы определения ЭМП в туннелях городского железнодорожного транспорта описаны в [19]. Показано, что прокладка тоннеля под системой электроснабжения переменного тока приводит к изменению потенциала земли; при этом блуждающие токи вызовут электрохимическую коррозию металлических компонентов, заглубленных вокруг пути, а также снизят долговечность железобетонной конструкции метрополитена. Создана модель тоннеля, с помощью которой рассчитано ЭМП в тоннеле. Разработана схема дренажной сети и линии обратного тока.

Электромагнитная связь между метрополитеном и электросетью исследована в [20]. Электропитание метро осуществляется постоянным током, что способно вызвать дополнительное подмагничивание трансформаторов в сетях переменного тока, негативно влияя на ста-

бильность их работы. Приведены результаты исследования подмагничивающего тока. Установлено, что величина индуцированного напряжения зависит не только от взаимного расположения метро и воздушных ЛЭП, но и от графика движения составов. Отмечено, что в пределах зоны взаимодействия порождаемое поездом магнитное поле (МП) оказывает большее влияние на процесс подмагничивания, нежели статическое МП, генерируемое током контактной сети.

Анализ вопросов ЭМС высокоскоростных железных дорог (ВЖД) проведён в [21]. Описаны особенности электромагнитной среды современных ВЖД и сформулирован ряд рекомендаций относительно направлений дальнейших исследований, касающихся борьбы с электромагнитными помехами и повышения устойчивости к воздействию сильных ЭМП.

Результаты исследования ЭМП на тяговой подстанции Сицзян приведены в [22]. Проведены замеры напряжённости ЭМП промышленной частоты, уровня радиопомех и коэффициентов затухания. Экспериментально полученные данные подтверждают, что напряжённости ЭМП в окрестностях подстанции ниже нормативных значений. Методы снижения магнитных полей в СТЭ постоянного тока предложены в [23]. Описан способ снижения МП, создаваемых ТС, для достижения электромагнитной совместимости. Показано, что оптимизация поперечного сечения питающих кабелей может улучшить подавление создаваемых магнитных полей.

Результаты измерений и расчётов МП частотой 50 Гц, создаваемого высокоскоростной железной дорогой, приведены в [24]. Инструментальные замеры сравнивались с данными, полученными с помощью имитационной модели. Статистическая модель радиочастотного ЭМП, генерируемого ТС, представлена в [25]. Модель базировалась на результатах проведённых измерений ЭМП радиодиапазона. После статистического анализа методом линейной множественной регрессии была предложена эмпирическая формула, позволяющая рассчитывать ЭМП.

Расчёты трёхмерного магнитного поля внутри высокоскоростного поезда проведены в [26]. Исследован характер ЭМП низких частот. Источником МП выступают токи, проходящие по проводам ТС.

Анализ представленных публикаций позволяет сделать следующие выводы:

- для многих важных задач, связанных с расчётами и анализом ЭМП на объектах электрифицированных железных дорог, предложены адекватные решения;
- однако задача учёта протяжённых металлических конструкций, проложенных вблизи трассы железной дороги, в полном объёме не решена;
- для корректного решения указанной задачи с учётом всех влияющих факторов может использоваться подход, предложенный в работах [27–30].

Результаты моделирования. Для типовой СТЭ 25 кВ (рис. 1) проведено моделирование режимов её работы с определением напряжённостей ЭМП при наличии в составе многопроводной системы двух трубопроводов с диаметром трубы 250 мм. Расчётная схема, часть которой показана на рис. 2, включала модели трёх тяговых трансформаторов и двух межподстанционных зон (МПЗ). Тяговая сеть левой МПЗ была разбита на пять

участков протяжённостью по 10 км. Кроме того, были представлены модели трёх линий электропередачи 220 кВ. Трубопроводы располагались параллельно трассе железной дороги (ЖД). Расстояние между осью ЖД и ближним трубопроводом составляло 20 м, а между дальним – 21 м. Проводимость грунта на моделируемом участке принята равной 0,01 См/км. Моделирование осуществлялось в программном комплексе Fazonord AC-DC [27, 28].

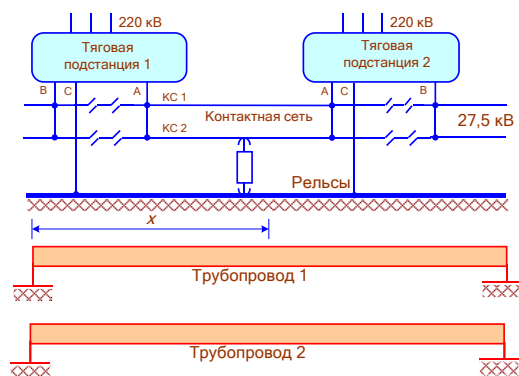


Рис. 1. Схема сближения ТС и трубопроводов

Предполагалось, что по краям трубопровода установлены стационарные заземлители с сопротивлениями

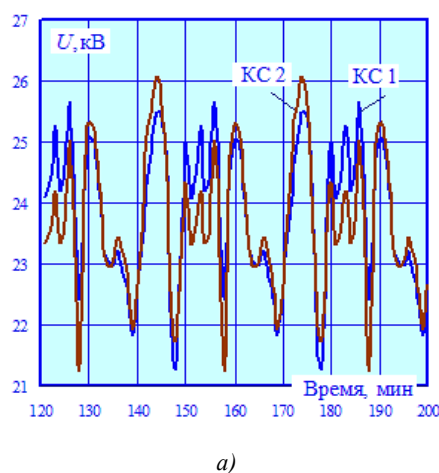
в один Ом, а также учитывалось распределённое заземление труб в 0,05 См/км путём формирования цепочечных схем. Моделировалось движение 7 поездов массой 6300 т в нечётном направлении и такого же количества составов массой 6000 т в чётном. Электромагнитные поля вычислялись в точке с координатой x , равной 10 км. Моделирование режимов и ЭМП осуществлялось с учётом высших гармоник (ВГ), генерируемых выпрямительными электровозами.

Результаты моделирования представлены на рис. 2–7. На рис. 2 показаны зависимости напряжений и токов контактной сети (КС) от времени: $U = U(t)$ и $I = I(t)$. Из них видно, что напряжения КС находятся в допустимом диапазоне, а по контактным подвескам протекают токи, достигающие в максимуме 524 А для КС 1 и 454 А для КС 2. За счёт электромагнитных влияний КС на трубопроводе наводились несинусоидальные токи и напряжения. Графики изменения коэффициентов гармоник напряжений и токов во времени показаны на рис. 3.

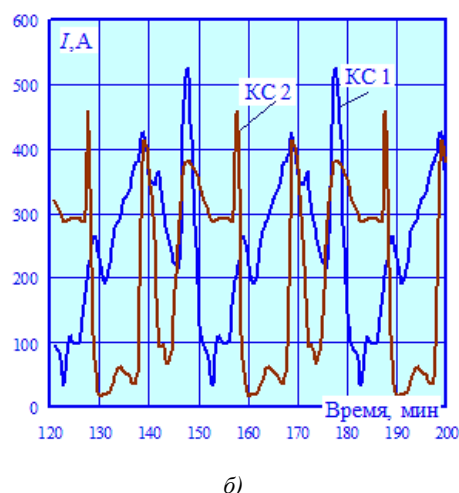
Эффективные наведённые напряжения и токи на трубопроводе (рис. 4) с учётом ВГ определялись так

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}; I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + (k_I / 100)^2}.$$

Из-за наличия высших гармоник формы кривых наведённых напряжений и токов существенно отличаются от синусоиды (рис. 5).

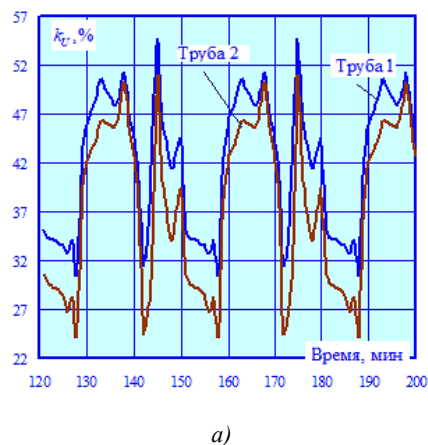


а)

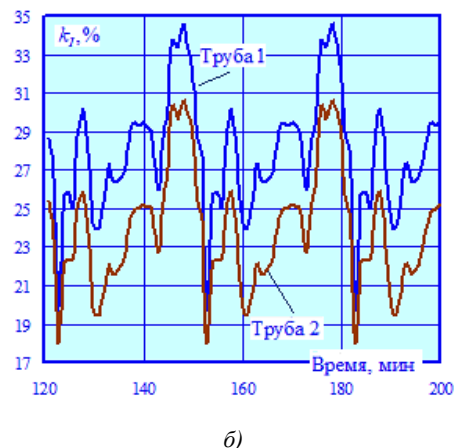


б)

Рис. 2. Напряжения (а) и токи КС (б)



а)



б)

Рис. 3. Коэффициенты гармоник напряжения (а) и тока на трубопроводах (б)

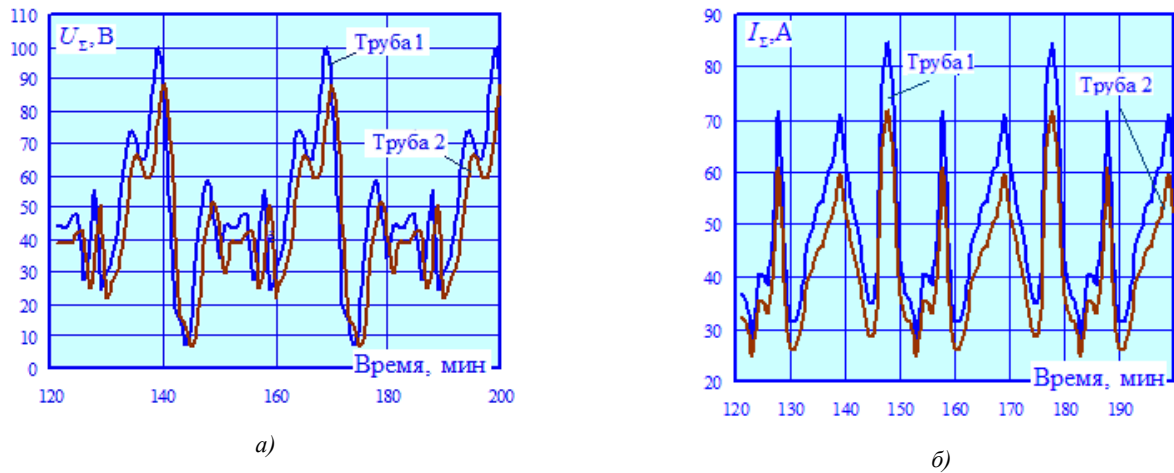


Рис. 4. Эффективные напряжения (а) и токи (б)

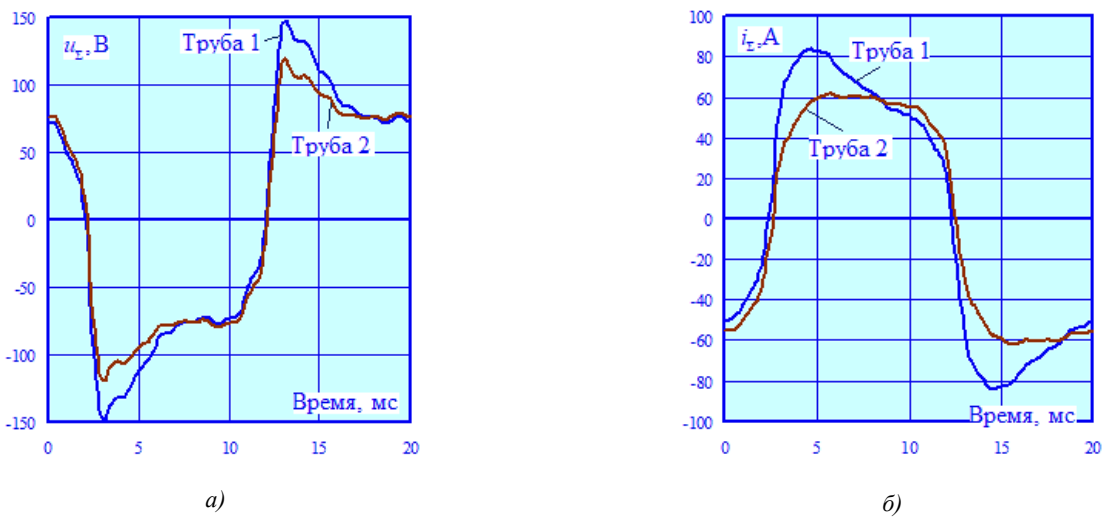


Рис. 5. Формы кривых наведённых напряжений (а) и токов (б)

Результаты определения напряжённостей ЭМП на высоте 1,8 м с учётом влияния заземлённых труб проиллюстрированы на рис. 6, 7. На рис. 6 показаны зависимости амплитуд напряжённостей ЭМП от координаты x оси, расположенной перпендикулярно трассе ЖД. Из них видно, что трубы заметно влияют на зависимость

$H_{\max} = H_{\max}(x)$. За счёт экранирующего действия труб амплитуды напряжённостей МП вблизи КС снижаются, а в окрестностях трубопроводов наблюдается их рост. На электрическое поле заземлённые трубы влияют незначительно.

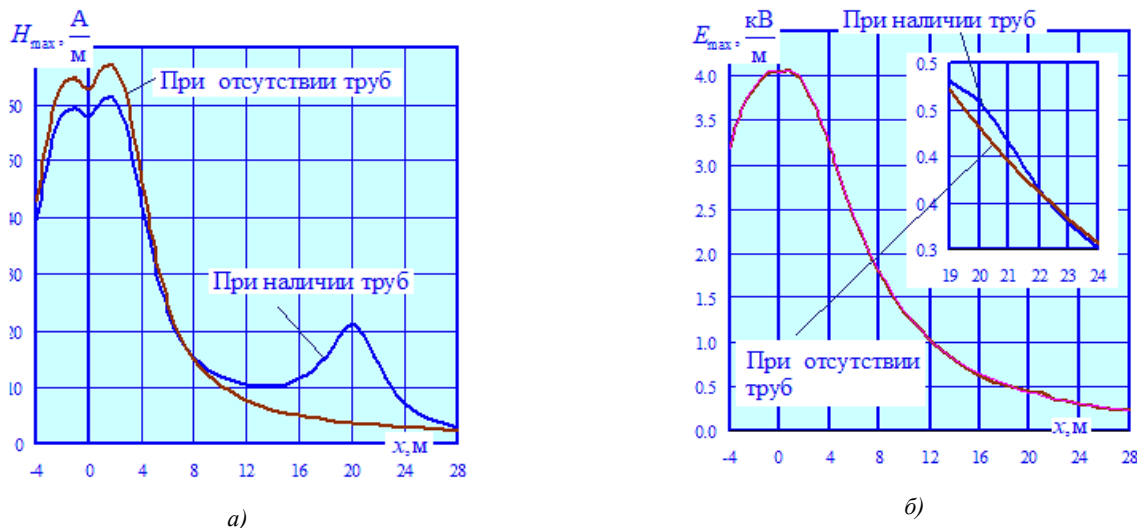
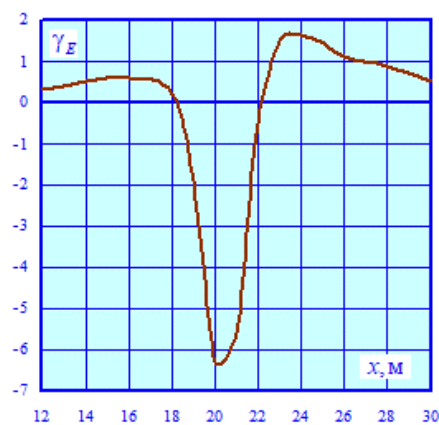


Рис. 6. Зависимости максимумов напряжённостей МП (а) и ЭП (б) от координаты x

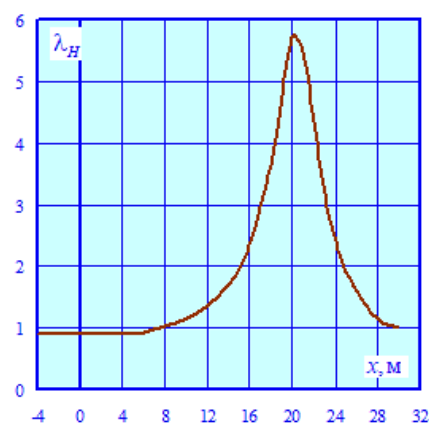
Отличия в уровнях напряжённостей ЭМП при наличии и отсутствии труб показаны на рис. 7. Параметры γ_E и λ_H , представленные на рис. 7, определялись так:

$$\gamma_E = \frac{E^{(\text{без труб})} - E^{(\text{с трубами})}}{E^{(\text{без труб})}} \cdot 100;$$

$$\lambda_H = \frac{H^{(\text{с трубами})}}{H^{(\text{без труб})}}.$$



а)



б)

Рис. 7. Зависимости $\gamma_E = \gamma_E(x)$ (а) и $\lambda_H = \lambda_H(x)$ (б)

Заключение. Разработаны методика, алгоритмы и компьютерные модели СТЭ, позволяющие рассчитывать напряжённости электромагнитных полей с учётом влияния высших гармоник, а также наличия металлических трубопроводов, заметно искажающих распределение напряжённостей ЭМП в пространстве. Научная новизна представленных результатов определяется следующими положениями:

– для расчёта ЭМП используются результаты моделирования режимов при движении поездов по реальным профилям пути;

Из рис. 7 видно, что при наличии трубопровода амплитуды напряжённостей МП вблизи него могут возрастать более чем в пять раз. Аналогичный параметр для электрического увеличивается вблизи труб на 6 %. Следует отметить, что непосредственно над трубопроводом напряжённости МП будут значительно выше. Наличие таких МП может негативно влиять на диагностическое оборудование сооружения и приборы электрохимической защиты.

– моделируются смеси ЭМП, образованные составляющими основной частоты и высшими гармониками до 39 включительно.

Практическая значимость разработанных моделей состоит в возможности их использования для выбора наиболее эффективных мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях, вблизи которых имеются протяжённые металлические объекты.

Исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Литература

1. Залесова О.В. Прогнозирование влияния электромагнитного поля контактной сети модернизированного участка октябрьской железной дороги на ВЛ высокого напряжения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. Т. 14. № 6. 2023. С. 39–47.
2. Савин Е.З. Воздействие электромагнитного поля электрифицированных железных дорог однофазного переменного тока на поляризационные явления в волоконных световодах // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. № 2 (98). 2025. С. 19–27.
3. Савин Е.З. Влияние электромагнитного поля электрифицированных железных дорог на поляризационные явления в волоконном световоде // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. № 4 (24). 2006. С. 81–87.
4. Микаэлян Е.Ю., Черных В.Н. Исследование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8 (59). С. 24.
5. Христинич А.Р., Христинич Р.М., Христинич Е.В. Анализ исследований по воздействию электромагнитного поля на железной дороге // Энергетик. № 9. 2023. С. 17–21.
6. Использование полей электрифицированных железных дорог при проведении электромагнитных зондирований // Е.Д. Алексанова, В.А. Куликов, П.Ю. Пушкарев [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. № 4. 2003. С. 60–63.
7. Вишнев В.С. Некоторые характеристики техногенного электромагнитного импульсного поля тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. № 1 (5). 2003. С. 16–23.
8. S.M. Apollonskii and A.N. Gorsky. "Calculation of electric and magnetic field strengths produced by a direct current traction network" IEEE EUROCON 2009, St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 873-880, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167737.
9. C.D. Oancea, F. Calin and V. Golea. "On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations" 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
10. T. Serdiuk, K. Serdiuk, V. Profatylov, H.H. Adhena, D. Thomas and S. Greedyu "Analysis of Electrified Systems and Electromagnetic Interferences on the Railways" 2023 IEEE

- 7thGlobal Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Nusa Dua, Indonesia, 2023, pp. 48–49, doi: 10.1109/GEMCCON57842.2023.10078191.
11. 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.
12. A.G. Martins-Britto, C.M. Moraes, F.V. Lopes and S. Rondineau "Low-frequency Electromagnetic Coupling Between a Traction Line and an Underground Pipeline in a Multilayered Soil" 2020 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasilia, Brazil, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/WCNPS0723.2020.9263746.
13. L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen and D. Zhang. "Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network" 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 2021, pp. 1–4, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
14. L.A. Zaitseva, A.S. Botchev, V.V. Zaitsev. "Electromagnetic of a Railroad Power-Supply Traction Network and a High-Voltage Line" in Proc, EMC Europe, 4th European Symposium on Electromagnetic Compatibility, Brugge, Belgium, 11–15 Sept. 2000, pp. 67–69.
15. N. Lu, F. Zhu, C. Yang, Y. Yang, H. Lu and Z. Wang. "The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 2029–2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
16. J. Liang et al. "Safety Assessment of Electromagnetic Exposure to Arcing in Electrified Railway Bow Networks" in IEEE Access, vol. 12, pp. 143352–143377, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3471174.
17. Zaitseva L., Zaitsev V. Computer Estimation of the EM Influence of Railroad AC Traction Networks. In Volume 2 of the Proceedings of the Fifth International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2002), pp. 1031–1034. 2002.
18. P. Vieira, N. Cota and A. Rodrigues "A VLF to UHF propagation model for evaluation of high-speed railway electromagnetic emissions in outside world" The 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 414–418.
19. Y. Long, Y. Li, Y. Liang, X. Cheng, Y. Zhao and X. Cao. "Research on electromagnetic pollution control methods in urban rail transit tunnels" 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961681.
20. G. Liu, J. Wang, S. Hu, H. Cai, L. Jia and R. Li. "Study on the electromagnetic coupling relationship between subway and power grid" 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279752.
21. Yinghong Wen. Weixing Hou. Research on Electromagnetic Compatibility of Chinese High Speed Railway System. Chinese Journal of Electronics. 2020. Volume: 29. Issue: 1.
22. X. Zeng et al., "Research on electromagnetic radiation of Xi-jiang traction substation," 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Suntec City, Singapore, 2018, pp. 24–27, doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393731.
23. C. Obiekiezie, R. d. C. Santo, K. Webb and J. Cosgrave. "Optimized Parallel Feeder for Achieving Low Magnetic Fields in an Overhead-Feeder-Type DC Rail System" in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 3, pp. 623–628, June 2018, doi: 10.1109/TEM.2017.2749684.
24. G. Lucca, M. Moro, R. Florio and G. Lidonnici. "Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian High Speed Railway system" International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Rome, Italy, 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396900.
25. G. Lucca. "Statistical Model of the Radio Frequency Electromagnetic Field Emitted by an Electrified Railway Line" 15th International Zurich Symposium and Technical Exposition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Zurich, Switzerland, 2003, pp. 391–396, doi: 10.23919/EMC.2003.10806258.
26. C. Buccella and M. Feliziani. "Three dimensional magnetic field computation inside a high speed train with a.c. electrification" 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03., Istanbul, Turkey, 2003, pp. 617–620 Vol.1, doi: 10.1109/ICSMC2.2003.1428334.
27. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск : Иркут. ун-т. 2005. 272 с.
28. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.
29. Буюкова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Середкин Д.А. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями и линиями электропередачи: монография. Ангарск : АНГТУ, 2024. 482 с.
30. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяжённые металлические конструкции: монография / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, А.Е. Крюков ; под ред. А.В. Крюкова. Иркутск : ИРГУПС, 2022. 189 с.

References

1. Zalesova O.V. Forecasting the Influence of the Electromagnetic Field of the Contact Network of the Modernized Section of the Oktyabrskaya Railway on High-Voltage Overhead Lines // Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences. Vol. 14. No. 6. 2023. Pp. 39–47.
2. Savin E.Z. The Impact of the Electromagnetic Field of Electrified Railways with Single-Phase Alternating Current on Polarization Phenomena in Fiber Optical Guides // Bulletin of the Rostov State Transport University. No. 2 (98). 2025. Pp. 19–27.
3. Savin E.Z. The Impact of the Electromagnetic Field of Electrified Railways on Polarization Phenomena in a Fiber Optical Guide // Bulletin of the Rostov State Transport University. No. 4 (24). 2006. Pp. 81–87.
4. Mikaelyan E.Yu., Chernykh V.N. Study of electromagnetic fields of an alternating current railway section // Engineering Bulletin of the Don. 2019. No. 8 (59). P. 24.
5. Khristinich A.R., Khristinich R.M., Khristinich E.V. Analysis of studies on the impact of electromagnetic fields on a railway // Energetik. No. 9. 2023. Pp. 17–21.
6. Use of fields of electrified railways in electromagnetic soundings // E.D. Aleksanova. V.A. Kulikov. P.Yu. Pushkarev [et al.]. // News of higher educational institutions. Geology and exploration. No. 4. 2003. Pp. 60–63.
7. Vishnev V.S. Some characteristics of the man-made electromagnetic pulse field of the railway traction network // Ural Geophysical Bulletin. No. 1 (5). 2003. P. 16–23.
8. S.M. Apollonskii and A.N. Gorsky. "Calculation of electric and magnetic field strengths produced by a direct current traction network" IEEE EUROCON 2009, St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 873–880, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167737.
9. C.D. Oancea, F. Calin and V. Golea. "On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations" 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.

10. T. Serdiuk, K. Serdiuk, V. Profatylov, H.H. Adhena, D. Thomas and S. Greedy. "Analysis of Electrified Systems and Electromagnetic Interferences on the Railways" 2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Nusa Dua, Indonesia, 2023, pp. 48–49, doi: 10.1109/GEMCCON57842.2023.10078191.
11. 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.
12. A.G. Martins-Britto, C.M. Moraes, F.V. Lopes and S. Rondineau, "Low-frequency Electromagnetic Coupling Between a Traction Line and an Underground Pipeline in a Multilayered Soil," 2020 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasilia, Brazil, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/WCNPS50723.2020.9263746.
13. L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen and D. Zhang "Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network" 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 2021, pp. 1–4, doi: 10.23919/URSIG-ASS51995.2021.9560338.
14. L.A. Zaitseva, A.S. Botchev, V.V. Zaitsev. "Electromagnetic of a Railroad Power-Supply Traction Network and a High-Voltage Line" in Proc, EMC Europe, 4th European Symposium on Electromagnetic Compatibility, Brugge, Belgium, 11–15 Sept. 2000, pp. 67–69.
15. N. Lu, F. Zhu, C. Yang, Y. Yang, H. Lu and Z. Wang. "The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse" in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 2029–2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
16. J. Liang et al. "Safety Assessment of Electromagnetic Exposure to Arcing in Electrified Railway Bow Networks" in IEEE Access, vol. 12, pp. 143352–143377, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3471174.
17. Zaitseva L., Zaitsev V. Computer Estimation of the EM Influence of Railroad AC Traction Networks. In Volume 2 of the Proceedings of the Fifth International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2002), pp. 1031–1034. 2002.
18. P. Vieira, N. Cota and A. Rodrigues. "A VLF to UHF propagation model for evaluation of high-speed railway electromagnetic emissions in outside world" The 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Taipei, Taiwan, 2012, pp. 414–418.
19. Y. Long, Y. Li, Y. Liang, X. Cheng, Y. Zhao and X. Cao, "Research on electromagnetic pollution control methods in urban rail transit tunnels" 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961681.
20. G. Liu, J. Wang, S. Hu, H. Cai, L. Jia and R. Li. "Study on the electromagnetic coupling relationship between subway and power grid" 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279752.
21. Yinghong Wen. Weixing Hou. Research on Electromagnetic Compatibility of Chinese High Speed Railway System. Chinese Journal of Electronics. 2020. Volume: 29. Issue: 1.
22. X. Zeng et al. "Research on electromagnetic radiation of Xi-jiang traction substation" 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Suntec City, Singapore, 2018, pp. 24–27, doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393731.
23. C. Obiekezie, R. d. C. Santo, K. Webb and J. Cosgrave. "Optimized Parallel Feeder for Achieving Low Magnetic Fields in an Overhead-Feeder-Type DC Rail System" in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 3, pp. 623–628, June 2018, doi: 10.1109/TEMC.2017.2749684.
24. G. Lucca, M. Moro, R. Florio and G. Lidonnici. "Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian High Speed Railway system". International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Rome, Italy, 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396900.
25. G. Lucca. "Statistical Model of the Radio Frequency Electromagnetic Field Emitted by an Electrified Railway Line" 15th International Zurich Symposium and Technical Exposition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Zurich, Switzerland, 2003, pp. 391–396, doi: 10.23919/EMC.2003.10806258.
26. C. Buccella and M. Feliziani. "Three dimensional magnetic field computation inside a high speed train with a.c. electrification" 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03., Istanbul, Turkey, 2003, pp. 617–620 Vol.1, doi: 10.1109/ICSMC2.2003.1428334.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex Asymmetric Modes of Electrical Systems. Irkutsk : Irkutsk University. 2005. 272 p.
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC Traction Power Supply Systems Based on Phase Coordinates. Moscow : Direct-Media, 2023. 156 p.
29. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Seredkin D.A. Modeling of Electromagnetic Fields Generated by Traction Networks and Transmission Lines: Monograph. Angarsk, AnGTU, 2024. 482 p.
30. Modeling of Electromagnetic Effects of Transmission Lines and Traction Networks on Extended Metal Structures: Monograph / A.V. Kryukov, A.V. Cherepanov, A.E. Kryukov; edited by A.V. Kryukov. Irkutsk : IrGUPS, 2022. 189 p.