

УДК 621.311: 621.331

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.010

Моделирование электромагнитных полей в тяговых сетях, оснащенных средствами повышения электромагнитной безопасности

Крюков Андрей Васильевич¹, Суслов Константин Витальевич²,
Середкин Дмитрий Александрович¹, Воронина Екатерина Викторовна¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *and_kryukov@mail.ru*

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, Москва

Аннотация. Цель представленных в статье исследований состояла в определении эффективности применения специализированных трансформаторов (СТ), включаемых в рассечку контактной сети (КС) и дополнительного обратного провода, для снижения электромагнитных загрязнений на объектах магистральных железных дорог. Для реализации сформулированной цели были разработаны компьютерные модели системы тягового электроснабжения (СТЭ) магистральной железной дороги переменного тока с напряжением в КС 25 кВ. СТЭ была оснащена СТ и дополнительными обратными проводами для усиления экранирующего действия рельсового пути с целью снижения напряженностей электромагнитного поля (ЭМП), негативно влияющего на персонал, население и окружающую среду. Проведено многовариантное моделирование для определения эффективности использования СТ. Для сравнения были выполнены расчеты ЭМП типовой СТЭ, в которой СТ не применялись. Моделирование осуществлялось в программном продукте Fazonord, разработанном в ИрГУПС и позволяющем рассчитывать режимы СТЭ и определять ЭМП тяговой сети (ТС) различного конструктивного исполнения. На основе полученных результатов было показано, что установка специализированных трансформаторов относительно небольшой мощности в 225 кВ·А, включаемых в рассечку контактной сети (КС) и дополнительного обратного провода, позволяет существенно улучшить условия электромагнитной экологии. Такой способ не требует значительных капитальных затрат и может быть реализован на действующих и проектируемых участках электрифицированных железных дорог. Компьютерное моделирование показало, что данный подход позволяет снизить средние величины напряженностей на высоте 1,8 метра для электрического поля на 20 %, а для магнитного – на 166 %. Аналогичные показатели для высоты 0,5 м соответственно равны 20 и 190 %. Физический механизм снижения интенсивности ЭМП состоит в усилении экранирующего действия рельсового пути. Используемый при решении вопросов электромагнитной экологии подход является оригинальным и отличается от известных следующими положениями: системность, заключающаяся в возможности расчета ЭМП с учетом свойств и характеристик сложной СТЭ и питающей электроэнергетической системы; универсальность, обеспечивающая моделирование тяговых сетей различных конструкций; адекватность внешней среде, достигаемая учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций, искусственных сооружений железнодорожного транспорта, таких, как галереи, мосты и тоннели; комплексность, обеспечиваемая совмещением расчетов режима и определением напряженностей ЭМП.

Ключевые слова: магистральные железные дороги, тяговые сети, электромагнитные поля, моделирование

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей в тяговых сетях, оснащенных средствами повышения электромагнитной безопасности / А.В. Крюков, К.В. Суслов, Д.А. Середкин, Е.В. Воронина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 113-127. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.010.

Введение. На объектах электрифицированных железных дорог имеются мощные источники ЭМП, которые оказывают негативное влияние на персонал, окружающую среду и электронное оборудование [1, 2]. В этих условиях развиваются патологии нервной, сердечно-сосудистой, репродуктивной, эндокринной и других систем организма человека. Возникают неврастенические проявления, повышенное потоотделение, тремор пальцев рук, изменения электрической активности головного мозга, проблемы в центральной и вегетативной нервных системах, нестабильность артериального давления и пульса, кардиоваскулярные нарушения [3].

Электромагнитно несбалансированные ТС железных дорог переменного тока создают ЭМП высокой интенсивности. Для уменьшения их негативного воздействия на персонал и окружающую природную среду следует применять технические средства, обеспечивающие существенное снижение напряженностей ЭМП ТС. К их числу можно отнести монтаж специализированных трансформаторов, включаемых в рассечку дополнительных обратных проводов. Токи в рельсах, противофазные токам в контактной сети, создают защитный экранирующий эффект. Однако, значительная часть рельсовых токов ответвляется в землю и экранирование снижается. Для его повышения в рассечку КС включают первичную обмотку СТ, а в рассечку обратного провода – вторичную, рис. 1. СТ имеет коэффициент трансформации, равный единице, поэтому в землю уходит меньший ток и экранирующий эффект увеличивается.

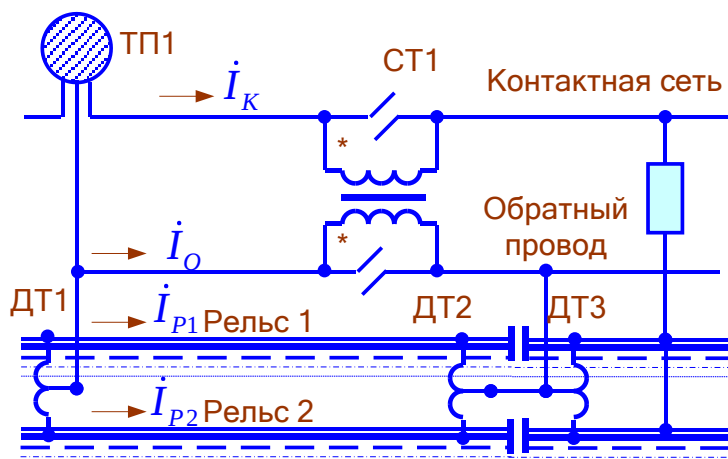


Рис. 1. Схемы включения СТ: ДТ – дроссель-трансформаторы

Важным параметром данного метода является расстояние между отсасывающими трансформаторами. Выбор его оптимального значения необходимо осуществлять с учетом режимных особенностей участка. Кроме того, в схеме (рис. 1) обратный провод для его эффективного использования должен монтироваться как можно ближе к контактной подвеске.

В условиях цифровизации транспортной электроэнергетики практическому применению СТ должно предшествовать компьютерное моделирование, для выполнения которого необходимы модели, адекватно учитывающие все влияющие факторы. Ниже приведены результаты исследований, направленных на разработку таких моделей.

Обзор литературы. Моделированию электромагнитных полей ЛЭП и ТС посвящено большое число работ. Вопросы использования программных модулей Comsol Multiphysics для расчета ЭМП, генерируемых вблизи высоковольтных линий электропередачи, рассмотрены в [4]. Представленные авторами результаты демонстрируют эффективность использования электростатических и магнитостатических модулей Comsol Multiphysics для расчета ЭМП на многих уровнях вблизи ЛЭП. Полученные ЭМП сравниваются с рекомендациями Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений. Анализ ЭМП на трассе высоковольтной ЛЭП с выделением влияния ключевых параметров представлен в [5]. К ним относятся: конфигурация поперечного сечения ЛЭП, уровень напряжения, токи нагрузки и величины несимметрии, тип провода, удельное сопротивление почвы и экранирующие эффекты близлежащих металлических конструкций, таких, как здания, заборы и трубопроводы. Обобщены результаты вычисления обширного набора вариантов.

Анализ электромагнитного поля между линией электропередачи и железной дорогой представлен в [6]. Основная цель проведенных исследований заключалась в создании строгой методологии и программного обеспечения, способных решать проблему электромагнитных связей в трехфазных системах. Дано краткое введение в метод конечных разностей, применяемый для оценки сложного ЭМП и выработки практической стратегии управления полем для

снижения негативных воздействий на окружающую среду. Разработанная авторами модель обеспечивает гибкость в ЭМП в широком диапазоне конфигураций, возникающих на практике. Используемый программный продукт обеспечивает моделирование, которое дает возможность глубокого изучения физических аспектов ЭМП, создаваемых воздушными ЛЭП вблизи любой металлической конструкции. Показано, что с увеличением ее длины повышается потенциал помех.

В [7] рассматривались ЭМП ЛЭП 132 кВ, которые рассчитывались на основе закона Био-Савара и уравнений Максвелла. Для упрощения расчета магнитного поля был применен метод наложения. Показано, что в настоящее время трассы высоковольтных ЛЭП стали проходить внутри городов. Магнитное поле вблизи них опасно для людей, а также фауны и флоры. Оно вызывает рак и некоторые другие заболевания, такие, как лейкемия. Измерения были выполнены с использованием системы цифровой экспозиции в Джохоре, Малайзия. Доказано, что рациональное расположение фаз может значительно снизить интенсивность ЭМП, а увеличение высоты на 8 м уменьшит напряженность на 79 %.

Результаты теоретических исследований, связанных с поглощением электромагнитной энергии и оценкой эффективности мер защиты персонала от воздействия ЭМП, приведены в [8]. Показано, что величины напряженностей зависят от расстояния между опорами. Описаны меры защиты от негативного влияния ЭМП. Данные, характеризующие уровни ЭМП под проводами линий 500 кВ, приведены в [9]. Расчеты выполнены для горизонтального и вертикального расположения проводников в сбалансированных и несбалансированных условиях. Моделирование проведено с помощью Matlab. Результаты сравнивались со стандартом IEEE для уровней безопасности в отношении воздействия ЭМП на человека.

Результаты анализа распределения ЭМП на высоковольтных подстанциях приведены в [10]. Представлены последние достижения в области моделирования ЭМП с помощью автоматизированного проектирования (САПР). Составные элементы подстанции (опоры, выключатели, шины, трансформаторы и т. д.) были представлены в виде трехмерных моделей и сохранены в базе данных в среде САПР SolidWorks. Разработанное программное обеспечение извлекает координаты элементов и на основе конкретных нагрузок вычисляет ЭМП. Описана трехмерная модель ячейки 400 кВ. Распределения ЭМП представляются на трехмерной модели САПР. Это позволяет визуализировать и определять области высокой концентрации ЭМП. Проведено сравнение между измерениями и смоделированным электрическим полем.

Модель для исследования ЭМП промышленной частоты, создаваемого высоковольтной ЛЭП, представлена в [11]. На ее основе определена напряженность электрического поля под ЛЭП и проведен анализ его структуры при вариациях расстояния между фазами линии и порядка их расположения для двухцепной ЛЭП и др. По результатам моделирования можно прогнозировать ЭМП под воздушной ЛЭП, что важно для защиты окружающей среды.

Анализ распределения электрического поля на трассе ЛЭП напряжением 400 кВ проведен в [12]. Отмечается, что ЭМП высоковольтных ЛЭП представляет серьезную угрозу для здоровья людей, работающих на открытом воздухе. Помехи от ЛЭП могут быть электростатическими и электромагнитными. Воздействие ЭМП повышает риск лейкемии, нейропсихологических расстройств и рака. Электрическое поле рассчитывается с использованием программного пакета ANSYS на базе метода конечных элементов. На основе полученных результатов можно определить допустимое расстояние, на котором могут находиться люди.

Оценка уровней влияния на человека ЭМП, вызванного высоковольтными ЛЭП, представлена в [13]. Отмечается, что с ростом числа ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН) усиливается электромагнитное загрязнение окружающей среды. Поэтому исследование ЭМП на рабочей частоте ЛЭП СВН имеет большое значение для снижения их негативного воздей-

ствия. Описан алгоритм моделирования ЭМП вокруг ЛЭП СВН, реализованный на основе метода заряда. Он позволяет вычислять напряженности с помощью Matlab в нормальных и неполнофазных режимах. Кроме того, на его основе могут быть выбраны мероприятия по уменьшению интенсивности ЭМП ЛЭП СВН.

Результаты моделирования ЭМП ЛЭП 330 кВ, расположенных вблизи зданий, описаны в [14]. На основе проектных требований к ЛЭП 330 кВ моделируется и анализируется ЭМП промышленной частоты вблизи ЛЭП и над зданием. Трехмерный метод конечных элементов используется для анализа распределения ЭМП вокруг и внутри типичной модели здания. Рассматриваются влияния на распределение ЭМП здания, расположенного вблизи и под линией. Предлагается модель здания, которое может быть построено из разных материалов. Результаты вычислений показывают экранирующий эффект и большое искажение электрического поля вблизи контура здания. Обсуждается влияние на напряженность электрического поля материала здания, высоты ЛЭП, количества этажей и ориентации окон, что важно для проектирования и строительства ЛЭП.

Методика моделирования ЭМП ТС вблизи контактных сетей и рельсов представлена в [15]. Рассмотрены аспекты электромагнитной совместимости (ЭМС) между компонентами ТС и прилегающей территорией. На железных дорогах применяются интегрированные системы, в которых электроэнергия используется для движения поездов, а также сигнализации, телекоммуникационных установок, питания центров управления и т. д. Проблемы ЭМС могут возникать не только в ТС, но и в связанных с ней сегментах. Тяговые сети должны работать безопасно. Кроме того, необходимо обеспечивать устойчивость инфраструктуры к электромагнитным помехам.

Метод расчета низкочастотного ЭМП вокруг линий электропередачи 15 кВ предложен в [16]. По решению правительства Монголии начаты работы по электрификации отдаленных городов и сельских районов и подключению их к центральному электроснабжению. Внедряются новые методы и технологии для передачи электроэнергии на большие расстояния. Введен новый стандарт напряжения 15 кВ. С момента пилотного запуска построено и эксплуатируется 4279 км ЛЭП 15 кВ и 268 подстанций. Для оценки уровней электромагнитного загрязнения от ЛЭП 15 кВ разработана расчетная методика определения напряженностей ЭМП в конкретной точке с использованием основных параметров и геометрических размеров опор ЛЭП.

Результаты расчетов ЭМП воздушных ЛЭП приведены в [17]. Представлен численный алгоритм расчета ЭМП с помощью метода граничных элементов. Он основан на интегральном уравнении, которое позволяет полностью определить задачу и сократить количество переменных, необходимых для ее решения. Предложенная методология может быть использована для нахождения градиентов потенциала не только по поверхности проводников, но и в любом интересующем месте пространства. Также приведен анализ влияния заземленных элементов на распределение поля. Сравнение с аналитическими результатами показывает высокую точность определения ЭМП. Показано, что заземленные элементы, которые обычно не учитываются, оказывают заметное влияние на ЭМП и могут быть учтены с помощью предложенной методологии.

Сравнение ЭМП вокруг ЛЭП различных конструкций проведено в [18]. Отмечается, что генерация ЭМП обусловлена изменяющимся во времени движением электрических зарядов. ЭМП излучается в окружающую среду электротехническими устройствами. Расчет ЭМП важен для оценки возможных рисков для здоровья человека. Растущая тенденция к использованию электроэнергии связана с увеличением передаваемой мощности и, следовательно, более высоким уровнем ЭМП. Моделирование было реализовано в программном обеспечении ANSYS.

Результаты исследования ЭМП на тяговой подстанции (ТП) Xijiang приведены в [19]. ЭМП изучалось с помощью измерений и расчетов. Также получены характеристики напряженности ЭМП промышленной частоты, радиопомех и их затухания на расстоянии. На основе сканирования получены параметры ЭМП, охватывающие полосу от 9 кГц до 1 ГГц. Чтобы уменьшить влияние высоковольтной ЛЭП предложена и применена новая схема измерений. Полученные результаты показали, что напряженности ЭМП вокруг ТП меньше допустимых значений.

Анализ влияния ЭМП, создаваемого электрифицированным железнодорожным участком представлен в [20]. Описан метод расчета собственных и взаимных сопротивлений контактной сети, используемой в Румынии. Проведен анализ влияния ЭМП, создаваемого участком электрифицированной железной дороги на металлические объекты, расположенные вблизи ТС. Полученные результаты дают важную информацию об уровнях электромагнитного влияния на окружающую среду.

Методы прогнозирования ЭМП на территориях высоковольтных подстанций, основанные на нечетких моделях, описаны в [21]. Показано, что ЭМП коррелируют с расположением оборудования и спецификой электрической нагрузки. Электромагнитные поля, создаваемые внутри типичной высоковольтной подстанции 220/66 кВ, моделировались с использованием конечно-разностной временной области. Разработано большое количество М-скриптов Matlab для расчета ЭМП. Рассмотрены различные конфигурации шин и графики нагрузки. Для проверки адекватности моделирования ЭМП фиксировались с помощью измерителей поля. Получено приемлемое расхождение между результатами моделирования и измерений.

ЭМП подстанций также проанализированы в статьях [22, 23]. В [22] отмечается, что снижение электромагнитного загрязнения из-за наличия электрических устройств в жилых районах, таких, как ЛЭП, подстанции и трансформаторы, является важной задачей. Из-за воздействия ЭМП эти устройства могут приводить к серьезным проблемам, таким как детская лейкемия и рак. Чтобы гарантировать здоровье людей коммунальные службы и другие организации могли принимать меры для снижения интенсивности ЭМП. Авторами проанализированы уровни воздействия ЭМП четырех реальных подстанций и соответствующих им распределительных фидеров. С помощью этих измерений и расчетов проведено сравнение с нормативными уровнями. В [23] выполнена оценка ЭМП внутри трансформаторных подстанций 400/110 кВ, 110/10 кВ и 35/10 кВ. В связи с тем, что геометрия элементов таких объектов сложная, был применен трехмерный подход к анализу ЭМП. Расчеты проводились для квазистатических состояний на частоте сети 50 Гц.

Вопросы электромагнитной совместимости и безопасности на трассах электрифицированных железных дорог рассмотрены в монографии [24] и статье [25]. В [24] отмечается сложность проблемы ЭМС в современной системе тягового электроснабжения, которая включает тяговую сеть, подвижной состав, оснащенный статическими преобразователями мощности, сигнальные системы, а также вспомогательное оборудование станций. Задачи ЭМС, требуют многоэтапного подхода, при этом вначале проблема должна быть идентифицирована, а затем определены ее границы с точки зрения соответствующих элементов и подсистем. Далее следует предложить теоретическую модель, например, с помощью эквивалентных схем, методов конечных элементов или других инструментов, чтобы оценить связанные электромагнитные явления, такие как характеристики распространения ЭМП и возможное экранирование. Результаты должны оцениваться по характеристикам источников. В зависимости от условий безопасности они могут быть сложными и трудоемкими. Для получения полного и точного результата необходимо свести неопределенность к минимуму. В книге дано общее описание же-

лезнодорожных систем с особым акцентом на элементы, которые влияют на общий электромагнитный профиль. Приведен обзор процессов управления, стандартов и правил. Подробно рассмотрены принципы, применимые на железной дороге.

В [25] подчеркивается, что транспортная инженерия представляет собой область, связанную со сложными электромагнитными средами. Поэтому моделирование ЭМС является важной частью проектирования и эксплуатации. Дан обзор существующих методов обеспечения ЭМС в области железнодорожного транспорта и суммированы достижения и недостатки. Электромагнитные поля, генерируемые высокоскоростными транспортными системами, проанализированы в [26]. Подчеркивается, что потенциальные риски для здоровья пассажиров и окружающей среды, связанные с ЭМП, вызванными работой высокоскоростных транспортных систем, стали серьезной проблемой. Магнитная индукция может вызывать физиологические эффекты в тканях организма. Приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений напряженностей ЭМП в рельсово-колесных системах. Для оценки воздействия на пассажиров учитывались вклады поля, создаваемые ТС, а также системами привода и подвески. Для сравнения были рассмотрены пиковые значения ЭМП.

Анализ аспектов моделирования и измерения параметров, определяющих условия ЭМС и безопасности на железнодорожных подстанциях проведен в [27]. Представлен глобальный аспект железнодорожных энергетических инфраструктур. Представлена высокочастотная модель и проведена проверка ее соответствия стандартам ЭМС. Моделировался каждый компонент инфраструктуры, а расчеты ЭМП сравнивались с измерениями. Результаты моделирования и анализа электромагнитной обстановки в ТС представлены в [28]. На основе теории многопроводных ЛЭП создана математическая модель ТС для изучения распределения тока в каждом проводнике. Метод конечных элементов использовался для создания имитационной модели ТС в нормальном рабочем состоянии и режимах замыкания контактного провода на рельсы. Моделировалось магнитное поле промышленной частоты, создаваемое ТС.

Анализ описанных публикаций позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрены важные аспекты, связанные с определением ЭМП, создаваемых ЛЭП и тяговыми сетями, и анализом условий электромагнитной безопасности и экологии. Однако метод решения задачи моделирования ЭМП, обеспечивающий определение ЭМП ТС, оснащенных СТ с обратным проводом, в рассмотренных работах не представлен. Такой метод может быть основан на алгоритмах, приведенных в [29, 30] и реализованных в программном комплексе Fazonord. Предварительные результаты анализа ЭМП ТС, оборудованных СТ, описаны в [31]. Ниже приведены новые модели, позволяющие рассчитывать напряженности ЭМП в ТС с СТ с учетом высших гармоник (ВГ), генерируемых выпрямительными электровозами переменного тока [32].

Методика моделирования. Моделирование режимов работы системы электроснабжения магистральной железной дороги осуществлялось с помощью метода фазных координат [29-31]. Полученные токи и напряжения позволяют произвести расчет ЭМП в сечении многопроводной системы с учетом гармонических искажений [32], что особенно важно при решении задач электромагнитной экологии, так как смесь полей разных частот усиливает негативное воздействие ЭМП на персонал, население и окружающую среду [33]. Для этого по найденным значениям потенциалов и токов $\dot{\mathbf{i}}^{(k)}$ осуществляется расчет зарядов $\dot{\mathbf{T}}^{(k)}$ проводов, после чего могут быть определены составляющие напряженностей электрического $\dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y$ и магнитного $\dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y$ полей:

$$\mathfrak{Z}_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{T}}^{(k)} \rightarrow \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y; \quad \mathfrak{Z}_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{i}}^{(k)} \rightarrow \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y,$$

где $\mathfrak{Z}_E(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, $\mathfrak{Z}_H(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – операторы; индекс E относится к электрическому полю, а H – к магнитному; $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ – наборы пространственных координат.

Затем находятся амплитудные значения $E_{\max}$, $H_{\max}$ напряженностей ЭМП

$$\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{E}_x, \dot{E}_y \rightarrow E_{\max}; \quad \Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{H}_x, \dot{H}_y \rightarrow H_{\max},$$

где $\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, $\Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – операторы.

Учет движения поездов осуществлялся с помощью имитационных моделей, представляющих собой наборы мгновенных схем, каждая из которых отвечает определенным положениям поездов на участке.

Тяговые сети переменного тока характеризуются наличием значительных гармонических искажений, что связано с особенностями конструкции современных электропоездов. Алгоритм расчета напряженностей ЭМП с учетом ВГ включает следующие этапы [32].

1. Выполняются расчеты режимов для всех контролируемых ВГ и определяются заряды и токи проводов

$$\dot{\mathbf{T}}^{(s)}, \dot{\mathbf{I}}^{(s)}, s = 1, 3, 5 \dots 39.$$

2. Вычисляются горизонтальные $\dot{E}_x^{(s)}$ и вертикальные $\dot{E}_y^{(s)}$ составляющие напряженностей ЭМП для каждой гармоники, включая основную

$$\mathfrak{T}_E^{(s)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{T}}^{(s)} \rightarrow \dot{E}_x^{(s)}, \dot{E}_y^{(s)}; \quad \mathfrak{T}_H^{(s)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{I}}^{(s)} \rightarrow \dot{H}_x^{(s)}, \dot{H}_y^{(s)}.$$

3. Определяются суммарные значения составляющих напряженностей $\dot{E}_{\Sigma x}, \dot{E}_{\Sigma y}; \dot{H}_{\Sigma x}, \dot{H}_{\Sigma y}$.
4. Рассчитываются амплитудные значения напряженностей ЭМП

$$\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{E}_{\Sigma x}, \dot{E}_{\Sigma y} \rightarrow E_{\Sigma \max}; \quad \Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{H}_{\Sigma x}, \dot{H}_{\Sigma y} \rightarrow H_{\Sigma \max}.$$

Описанный подход является оригинальным и отличается от известных следующими положениями: системность, заключающаяся в возможности моделирования ЭМП с учетом свойств и характеристик сложной системы тягового электроснабжения (СТЭ) и питающей электроэнергетической системы; универсальность, обеспечивающая расчет режимов ТС различных конструкций; адекватность внешней среде, достигаемая учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций, искусственных сооружений ЖД транспорта, таких как галереи, мосты и тоннели; комплексность, обеспечиваемая совмещением расчетов режима и определением напряженностей ЭМП.

Результаты и обсуждение. Задача улучшения электромагнитной экологии рассматривалась на примере СТЭ, включающей следующие элементы: двухпутную тяговую сеть 25 кВ, протяженностью в 40 км, представленную в виде 10 участков по 4 км; питающие ЛЭП 220 кВ; тяговые подстанции с трансформаторами 40 МВ·А. На каждом участке были установлены СТ, включаемые в расщелку КС и обратных проводов, смонтированных на опорах ТС. Для сравнения были выполнены расчеты ЭМП типовой СТЭ, в которой СТ не применялись.

Тяговые нагрузки создавались движением пяти грузовых поездов массой 5800 т в четном и нечетном направлениях с интервалом 30 минут. Для анализа был выбран промежуток времени с 50 по 100 минуту, отвечающий полному заполнению участка поездами. Контроль токов, напряжений и электромагнитных полей осуществлялся в его начале. Результаты моделирования ЭМП представлены на рис. 2 – 8 и в табл. 1.

На рис. 2, 3 приведены зависимости амплитуд напряженностей электрического поля от времени t : $E_{\max} = E_{\max}(t)$ и $H_{\max} = H_{\max}(t)$, показывающие, что эти параметры заметно изменяются при движении поездов по участку. Указанные графики построены для двух ситуаций: в первой

СТ отсутствовали, а во второй были включены в рассечку КС и обратного провода. Напряженности ЭМП рассчитывались для двух значений высоты точки наблюдения: 1,8 и 0,5 м, что позволяет оценить их воздействие на персонал и окружающую природную среду.

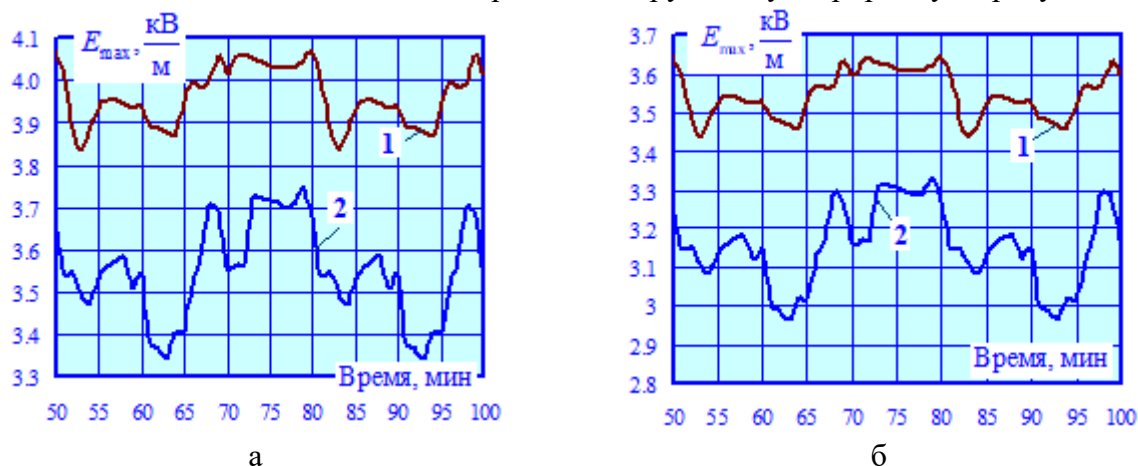


Рис. 2. Динамика изменений амплитуд напряженностей электрического поля при $x=0$: а – на высоте 1,8 м; б – на высоте 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

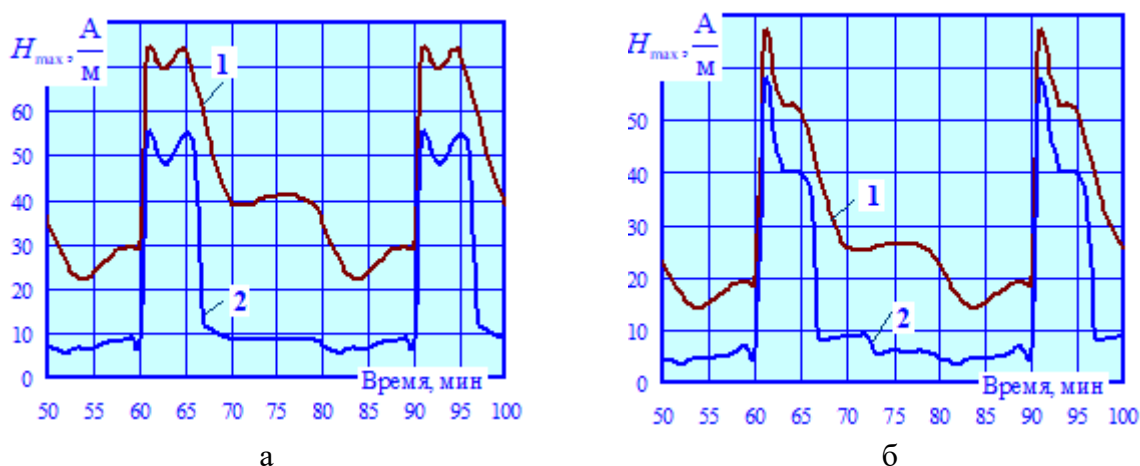


Рис. 3. Динамика изменений амплитуд напряженностей магнитного поля $x=0$: а – на высоте 1,8 м; б – на высоте 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

На рис. 4 приведены сравнительные диаграммы $E_{\max} = E_{\max}(t)$ и $H_{\max} = H_{\max}(t)$, построенные для принятых значений высот y . На рис. 5 и 6 показаны графики $E_{\max} = E_{\max}(x)$ и $H_{\max} = H_{\max}(x)$, где x – координата оси, направленной перпендикулярно трассе железной дороги.

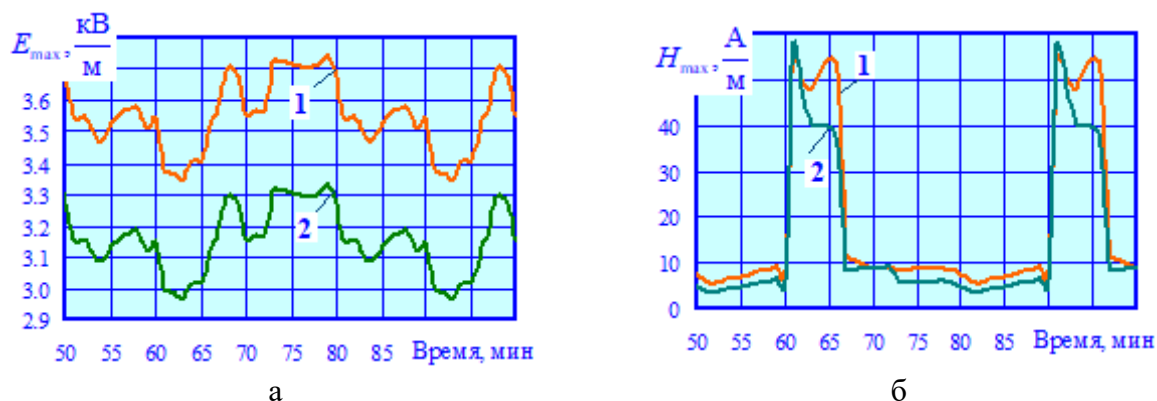


Рис. 4. Сравнение амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на разных высотах наблюдения $x = 0$: 1 – высота 1,8 м; 2 – высота 0,5 м

В таблице 1 приведены максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП.

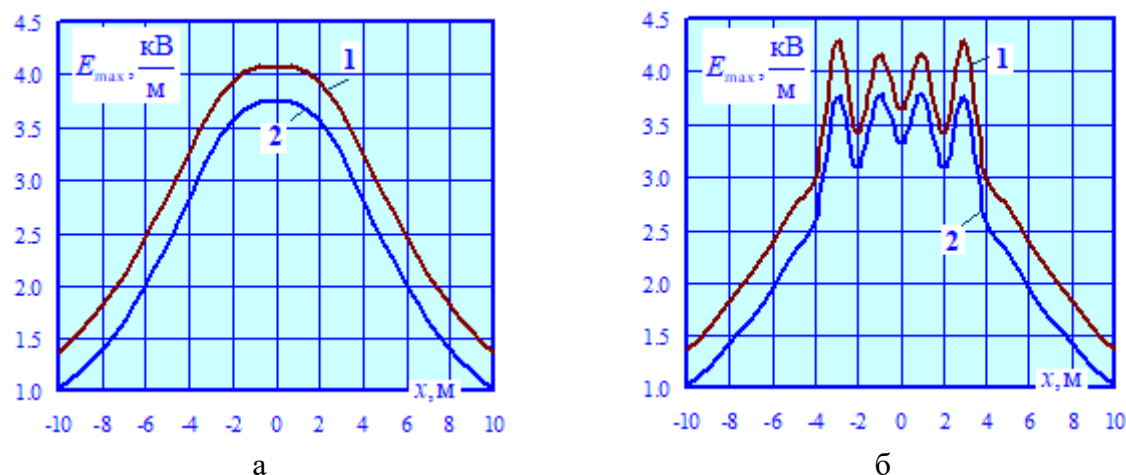


Рис. 5. Зависимость максимумов амплитуд электрического поля от координаты x : а – высота 1.8 м; б – высота 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

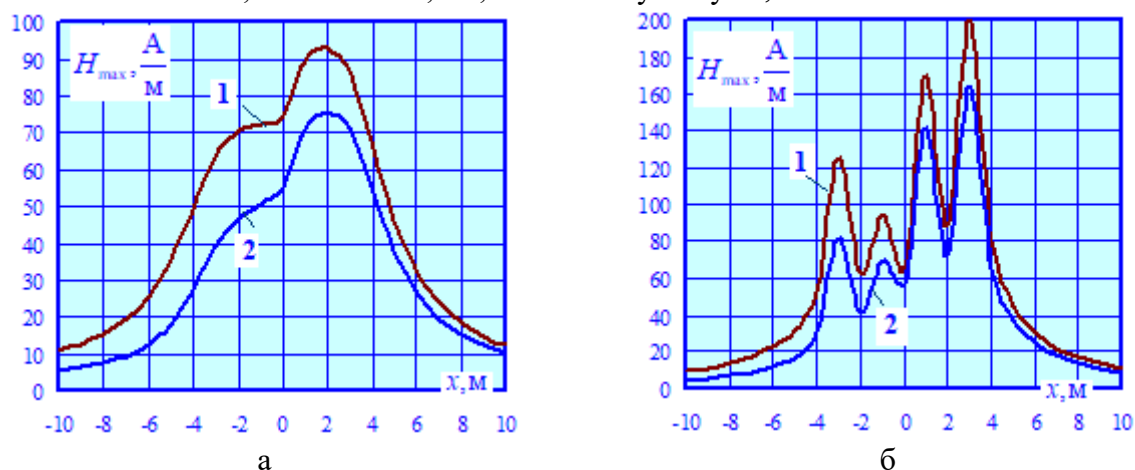


Рис. 6. Зависимости максимумов амплитуд магнитного поля от координаты x : а – высота 1.8 м; б – высота 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

Таблица 1. Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	Показатель	$y = 1.8 \text{ м}$			$y = 0.5 \text{ м}$		
		СТ отсутствуют	СТ включены	Различие, %	СТ отсутствуют	СТ включены	Различие, %
E_{max} , кВ/м	Ср. значение	2,67	2,23	20	2,64	2,19	20
	Максимум	4,07	3,74	9	4,29	3,78	14
H_{max} , А/м	Ср. значение	20,01	7,53	166	23,33	8,06	190
	Максимум	93,11	75,54	23	199,67	164,04	22

Полученные результаты моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Электромагнитно несбалансированная тяговая сеть создает значительные уровни напряженности ЭМП, при этом ЭМП ТС состоит из смеси составляющих разных частот, что усиливает его негативное воздействие на персонал, население и окружающую среду [33].
2. Путем установки специализированных трансформаторов относительно небольшой мощности (225 кВ·А), включаемых в рассечку КС и дополнительного обратного провода, возможно заметно снизить напряженности ЭМП и улучшить условия электромагнитной безопасности и экологии.

3. Данный подход не требует значительных капитальных затрат и может быть реализован на действующих и проектируемых участках электрифицированных железных дорог.
4. Уровни снижения напряженностей ЭМП с помощью СТ зависят от многих факторов, таких, как: масс поездов, графиков движения составов, профилей пути, характеристик используемых локомотивов, электрических свойств грунта, профиля рельефа (насыпей, выемок, скосов). Поэтому решение о применении СТ должно приниматься на основе результатов компьютерного моделирования по описанным в данной работе моделям.
5. В особо критичных зонах по условиям безопасности и экологии можно использовать дополнительные меры по снижению негативного воздействия ЭМП, описанные в работе [31].

На основе анализа публикаций и результатов компьютерного моделирования установлено, что электромагнитно несбалансированные тяговые сети 25 кВ могут создавать ЭМП значительной интенсивности, которые могут оказывать негативное влияние на людей и окружающую среду, особенно в ситуации прохождения железной дороги через территории жилой застройки. Учитывая значительную протяженность электрифицированных ЖД и массовое строительство новых линий, ущербы от негативных воздействий ЭМП можно признать существенными. Кроме того, для подключения тяговых подстанций используются высоковольтные ЛЭП, также негативно влияющие на окружающую среду.

Компьютерное моделирование, проведенное в программном комплексе Fazonord, показало, что негативные влияния ТС могут быть значительно снижены на основе применения специализированных трансформаторов, включаемых в рассечку КС и дополнительного обратного провода. В ходе дальнейших исследований по данной тематике запланировано решить следующие задачи:

- 1) разработать алгоритмы и компьютерные модели для определения оптимального расстояния между СТ;
- 2) предложить методику выбора рациональных координат подвески обратного провода;
- 3) вблизи трассы железной дороги располагается значительное число проводящих конструкций, которые могут оказывать влияние на характер распределения ЭМП в пространстве, окружающем тяговую сеть; к ним можно отнести опоры ТС, мосты, современные здания с металлическими несущими элементами, путепроводы и т. д.; вблизи этих сооружений электромагнитное поле становится трехмерным и задача его моделирования существенно усложняется; для ее решения можно использовать подход, предложенный в [34], основанный на концепции проводников ограниченной длины.

Заключение. Мощные источники ЭМП, расположенные на железнодорожных станциях и перегонах, могут оказывать негативное влияние на персонал, окружающую среду и современное электронное оборудование информационных систем и телекоммуникаций. Воздействие смесей ЭМП, включающих составляющие различных частот, вызывают патологии нервной, сердечно-сосудистой, репродуктивной, эндокринной и других систем организма человека; при этом возникают следующие симптомы: неврастенические проявления, повышенное потоотделение, тремор пальцев рук, изменения электрической активности головного мозга, функциональные нарушения центральной и вегетативной нервной системы; нестабильность артериального давления и пульса, кардиоваскулярные отклонения.

Эффективным средством снижения негативных влияний ЭМП ТС, не требующим значительных капитальных затрат и реализуемым на действующих и проектируемых участках электрифицированных железных дорог, является установка специализированных трансформаторов относительно небольшой мощности (225 кВ·А), включаемых в рассечку КС и дополнительного обратного провода. Компьютерное моделирование показало, что данный подход позволяет снизить средние величины напряженностей на высоте 1,8 метра для электрического

поля на 20 %, а для магнитного – на 166 %. Аналогичные показатели для высоты 0,5 м соответственно равны 20 и 190 %. Физический механизм снижения интенсивности ЭМП состоит в усилении экранирующего действия рельсового пути.

Список источников

1. Blake Levit B. Electromagnetic fields: a consumer's guide to the issues and how to protect ourselves. iUniverse, 1995, 462 p.
2. Suslov, K., Kryukov, A., Voronina, E., Ilyushin, P. Consideration of the influence of supports in modeling the electromagnetic fields of 25 kV traction networks under emergency conditions. Global energy interconnection, 2024, vol. 7, iss 4, pp. 528-540. DOI: 10.1016/j.gloi.2024.08.004.
3. Титов Е.В. Анализ возможных последствий влияния электромагнитного загрязнения окружающей среды на биологические объекты / Е.В. Титов, Д.А. Медведева // Актуальные вопросы энергетики. – Омск, 2021. – С. 150-153.
4. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics. 2014 International conference on electrical sciences and technologies in Maghreb (CISTEM), IEEE, 2014, DOI:10.1109/CISTEM.2014.7076989.
5. Liu J., Ruan W., Fortin S. et al. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis. 2002 Proceedings, International Conference on power system technology, IEEE, 2002, DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575.
6. Al Dhalaan S.M., Elhribawy M.A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway. CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a caring and humane technology, IEEE, 2003, DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432.
7. Ali Orozi Sougui, Mohd Zarar Mohd Jenu. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132 kV power lines. 2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetic (APACE), IEEE, 2014, pp. 207-210, DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781.
8. Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from HT power lines. 2008 10th International conference on electromagnetic interference & compatibility, IEEE, 2008, pp. 395-397.
9. Xiao L., Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines. 2014 North American power symposium (NAPS), IEEE, 2014, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378.
10. Purcar M., Munteanu C., Avram A. et al. CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv substations and investigation of the human exposure. 2016 International Conference on applied and theoretical electricity (ICATE), IEEE, 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICATE.2016.7754698.
11. Xu L., Li Y., Yu J. et al. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency. 2006 International conference on power system technology, IEEE, 2006, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493.
12. Das H., Gogoi K., Chatterjee S. Analysis of the effect of electric field due to High Volt-age Transmission lines on humans. 2015 1st Conference on power, dielectric and energy management at NERIST (ICPDEN), IEEE, 2015, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491.
13. Wang F., Wang W., Jiang Z. et al. Analysis of the line-frequency electric field in-tensity around EHV transmission. 2010 International conference on electrical and control engineering, IEEE, 2010, pp. 3343-3346. DOI: 10.1109/iCECE.2010.815.
14. Yang B., Wang S., Wang Q. et al. Simulation and analysis for power frequency electric field of building close to power transmission lines. 2014 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC), IEEE, 2014, pp. 451-454, DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899014.
15. Oancea C.D., Calin F., Golea V. 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.
16. Bat-Erdene B., Battulga M., Tuvshinzaya G. Method of calculation of low-frequency electromagnetic field around 15 kV transmission lines. 2020 IEEE International conference on power and energy (PECon), Penang, Malaysia, 2020, pp. 40-43, DOI: 10.1109/PECon48942.2020.9314436.
17. Duane I., Afonso M., Paganotti A. et al. Computation of the electromagnetic fields of overhead power lines with boundary elements. 2022 IEEE 20th Biennial conference on electromagnetic field computation (CEFC), Denver, CO, USA, 2022, pp. 1-2, DOI: 10.1109/CEFC55061.2022.9940848.
18. Medved' D., Zbojovský J., Pavlík M. et al. Comparison of electromagnetic fields around electric power lines. 2020 21st International scientific conference on electric power engineering (EPE), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269217.
19. Zeng X., Ma H., Pi C. et al. Research on electromagnetic radiation of Xijiang 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.
20. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section. 2020 7th International Conference on energy efficiency and agricultural engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279005.
21. Ghanian S.M. Fuzzy prediction of the electromagnetic fields inside high voltage substations. 2016 IEEE International Conference on high voltage engineering and application (ICHVE), Chengdu, China, 2016, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800809.
22. Morales J.A., Gavela P., Bretas A.S. Electromagnetic fields in distribution feeders and electrical substations analysis: A study case in Ecuador. 2015 North American power symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA, 2015, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2015.7335084.
23. Nikolovski S., Klaić Z., Kraus Z. et al. Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations. The 33rd International convention MIPRO, Opatija, Croatia, 2010, pp. 641-646.
24. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 568 p.
25. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo et al. EMC in rail transportation. Energy procedia, 2016, vol. 104, pp. 526-531, DOI:10.1016/j.egypro.2016.12.089.
26. Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems. Transportation systems and technology, 2018, vol. 4(2), pp.152-166, DOI:10.17816/transsyst201842152-166.
27. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. et al. EMC analysis of railway power substation modeling and measurements aspects. Infrastructure design, signalling and security in railway, DOI:10.5772/37522.
28. Lu Zh., Yun Zh., Song Ch. Et al. 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), IEEE, 2021, DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
29. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск, 2005. – 273 с.
30. Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
31. Буякова Н.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков под общ. ред. А.В. Крюкова. – Ангарск, 2018. – 382 с.
32. Буякова Н.В. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции железных дорог / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков и др. // Электричество, 2022. – №5. – С. 28-38.
33. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей. / А.Р. Закирова. – Екатеринбург, 2018. – 171 с.
34. Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // System analysis and mathematical modeling, 2021. – № 2. – С. 145-163.

Крюков Андрей Васильевич. Доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790. and_kryukov@mail.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Суслов Константин Витальевич. Доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета "МЭИ", профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. Author ID: 445976, SPIN: 1161-1920, ORCID: 0000-0003-0484-2857, dr.souslov@yandex.ru, 11250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

Середкин Дмитрий Александрович. Кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 1045505, SPIN: 9366-3331, ORCID: 0000-0001-5628-2252, dmitriy987@mail.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Воронина Екатерина Викторовна. Аспирант кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 1175580, SPIN: 3271-7313, ORCID: 0009-0008-4399-6086, eka7erina.voronina@yandex.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 621.311: 621.331

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.010

Modeling of electromagnetic fields in traction networks equipped with means of increasing electromagnetic safety

Andrey V. Kryukov¹, Konstantin V. Suslov², Dmitry A. Seredkin¹, Ekaterina V. Voronina¹

¹Irkutsk State Transport University,

Irkutsk, Russia, and kryukov@mail.ru

²National Research University "MPEI",

Moscow, Russia

Abstract. The objective of the studies presented in the article was to determine the efficiency of using specialized transformers (ST) included in the contact network (CN) section and an additional return wire to reduce electromagnetic pollution at mainline railway facilities. To achieve this objective, computer models of the traction power supply system (TPS) of an AC mainline railway with a CN voltage of 25 kV were developed. The TPS was equipped with ST and additional return wires to enhance the shielding effect of the track in order to reduce electromagnetic field strengths that have a negative impact on personnel, the population and the environment. Multivariate modeling was performed to determine the efficiency of using ST. For comparison, EMF calculations were performed for a typical TPS in which ST were not used. Modeling was carried out in the Fazonord software product developed at IrGUPS and allowing one to calculate TPS modes and determine EMF of the traction network (TN) of various designs. The obtained results showed that installation of specialized transformers of relatively low power of 225 kVA, included in the section of the compressor station and additional return wire, allows to significantly improve the conditions of electromagnetic ecology. This method does not require significant capital expenditures and can be implemented on existing and planned sections of electrified railways. Computer modeling showed that this approach allows to reduce average values of intensity at a height of 1.8 meters for the electric field by 20%, and for the magnetic field - by 166%. Similar indicators for a height of 0.5 m are 20 and 190%, respectively. The physical mechanism for reducing the intensity of EMF consists in enhancing the shielding effect of the track. The approach used in solving problems of electromagnetic ecology is original and differs from known ones in the following provisions: systematicity, consisting in the ability to calculate EMF taking into account the properties and characteristics of a complex traction power system and the supply electric power system; versatility, ensuring modeling of traction networks of various designs; adequacy to the external environment, achieved by taking into account the profile of the underlying surface, underground communications, artificial structures of railway transport, such as galleries, bridges and tunnels; complexity, ensured by combining calculations of the mode and determination of the EMF strengths.

Keywords: mainline railways, traction networks, electromagnetic fields, modeling

References

1. Blake Levit B. Electromagnetic fields: a consumer's guide to the issues and how to protect ourselves. iUniverse, 1995, 462 p.
2. Suslov, K., Kryukov, A., Voronina, E., Ilyushin, P. Consideration of the influence of supports in modeling the electromagnetic fields of 25 kV traction networks under emergency conditions. Global energy interconnection, 2024, vol. 7, iss 4, pp. 528-540. DOI: 10.1016/j.gloi.2024.08.004.
3. Titov E.V., Medvedeva D.A. Analiz vozmozhnykh posledstviy vliyaniya elektromagnitnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy na biologicheskiye ob"yekty [Analysis of possible consequences of the influence of electromagnetic pollution of the environment on biological objects]. Aktual'nyye voprosy energetiki [Actual issues of energy, Omsk], 2021, pp. 150-153.
4. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics. 2014 International conference on electrical sciences and technologies in Maghreb (CISTEM), IEEE, 2014, DOI:10.1109/CISTEM.2014.7076989.
5. Liu J., Ruan W., Fortin S. et al. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis. 2002 Proceedings, International Conference on power system technology, IEEE, 2002, DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575.
6. Al Dhalaan S.M., Elhirbawy M.A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway. CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a caring and humane technology, IEEE, 2003, DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432.

7. Ali Orozi Sougui, Mohd Zarar Mohd Jenu. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132 kV power lines. 2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetic (APACE), IEEE, 2014. pp. 207-210, DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781.
8. Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from HT power lines. 2008 10th International conference on electromagnetic interference & compatibility, IEEE, 2008, pp. 395-397.
9. Xiao L., Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines. 2014 North American power symposium (NAPS), IEEE, 2014, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378.
10. Purcar M., Munteanu C., Avram A. et al. CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv substations and investigation of the human exposure. 2016 International Conference on applied and theoretical electricity (ICATE), IEEE, 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICATE.2016.7754698.
11. Xu L., Li Y., Yu J. et al. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency. 2006 International conference on power system technology, IEEE, 2006, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493.
12. Das H., Gogoi K., Chatterjee S. Analysis of the effect of electric field due to High Volt-age Transmission lines on humans. 2015 1st Conference on power, dielectric and energy management at NERIST (ICPDEN), IEEE, 2015, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491.
13. Wang F., Wang W., Jiang Z. et al. Analysis of the line-frequency electric field in-tensity around EHV transmission. 2010 International conference on electrical and control engineering, IEEE, 2010, pp. 3343-3346. DOI: 10.1109/iCECE.2010.815.
14. Yang B., Wang S., Wang Q. et al. Simulation and analysis for power frequency electric field of building close to power transmission lines. 2014 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC), IEEE, 2014, pp. 451-454, DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899014.
15. Oancea C.D., Calin F., Golea V. 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.
16. Bat-Erdene B., Battulga M., Tuvshinzaya G. Method of calculation of low-frequency electromagnetic field around 15 kV transmission lines. 2020 IEEE International conference on power and energy (PECon), Penang, Malaysia, 2020, pp. 40-43, DOI: 10.1109/PECon48942.2020.9314436.
17. Duane I., Afonso M., Paganotti A. et al. Computation of the electromagnetic fields of overhead power lines with boundary elements. 2022 IEEE 20th Biennial conference on electromagnetic field computation (CEFC), Denver, CO. USA, 2022, pp. 1-2, DOI: 10.1109/CEFC55061.2022.9940848.
18. Medved' D., Zbojovský J., Pavlík M. et al. Comparison of electromagnetic fields around electric power lines. 2020 21st International scientific conference on electric power engineering (EPE), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269217.
19. Zeng X., Ma H., Pi C. et al. Research on electromagnetic radiation of Xijiang 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.
20. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section. 2020 7th International Conference on energy efficiency and agricultural engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279005.
21. Ghania S.M. Fuzzy prediction of the electromagnetic fields inside high voltage substations. 2016 IEEE International Conference on high voltage engineering and application (ICHVE), Chengdu, China, 2016, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800809.
22. Morales J.A., Gavela P., Bretas A.S. Electromagnetic fields in distribution feeders and electrical substations analysis: A study case in Ecuador. 2015 North American power symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA, 2015, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2015.7335084.
23. Nikolovski S., Klaić Z., Kraus Z. et al. Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations. The 33rd International convention MIPRO, Opatija, Croatia, 2010, pp. 641-646.
24. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 568 p.
25. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo et al. EMC in rail transportation. Energy procedia, 2016, vol. 104, pp. 526-531, DOI:10.1016/j.egypro.2016.12.089.
26. Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems. Transportation systems and technology, 2018, vol. 4(2), pp.152-166, DOI:10.17816/transsyst201842152-166.
27. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. et al. EMC analysis of railway power substation modeling and measurements aspects. Infrastructure design, signalling and security in railway, DOI:10.5772/37522.

28. Lu Zh., Yun Zh., Song Ch. Et al. 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), IEEE, 2021, DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
29. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005, 273 p.
30. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moskva: Direkt-Media [Moscow: Direct-Media], 2023, 156 p.
31. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog: modelirovaniye i upravleniye [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and control]. Angarsk, 2018, 382 p.
32. Buyakova, N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. et al. Uchet garmonicheskikh iskazheniy pri modelirovanii elektromagnitnykh poley, sozdavayemykh liniyami elektropredachi, pitayushchimi tyagovyye podstantsii zheleznnykh dorog [Accounting for harmonic distortions in modeling electromagnetic fields generated by power transmission lines supplying railway traction substations]. Elektrichestvo [Electricity], 2022, no. 5, pp. 28-38.
33. Zakirova A.R. Zashchita elektrotekhnicheskogo personala ot vrednogo vozdeystviya elektromagnitnykh poley [Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields]. Yekaterinburg, 2018, 171 p.
34. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovaniye elektromagnitnykh poley, sozdavayemykh sistemoy korotkikh tokovedushchikh chastey [Modeling of electromagnetic fields generated by a system of short current-carrying parts]. System analysis and mathematical modeling, 2021, no. 2, pp. 145-163.

Kryukov Andrey Vasilyevich. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport of the Irkutsk State Transport University, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering of the Irkutsk National Research Technical University. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790. and_kryukov@mail.ru, 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15.

Suslov Konstantin Vitalievich. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources of the National Research University "MPEI", Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering of the Irkutsk National Research Technical University. Author ID: 445976, SPIN: 1161-1920, ORCID: 0000-0003-0484-2857, dr.suslov@yandex.ru, 11250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14.

Seredkin Dmitriy Aleksandrovich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport of the Irkutsk State Transport University. Author ID: 1045505, SPIN: 9366-3331, ORCID: 0000-0001-5628-2252, dmitriy987@mail.ru, 664074, 664074, Russia, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15

Voronina Ekaterina Viktorovna. Postgraduate student of the Department of Electric Power Engineering of Transport of Irkutsk State University of Railway Communications. Author ID: 1175580, SPIN: 3271-7313, ORCID: 0009-0008-4399-6086, eka7erina.voronina@yandex.ru, 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 01.05.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was submitted 04/23/2025; approved after reviewing 05/01/2025; accepted for publication 05/05/2025.