

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2026-1-30-38

Моделирование электромагнитных влияний трёхфазной тяговой сети на смежные линии электропередачи

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2b}, Б.А. Аржанников^{3c}, И.А. Фесак^{4d}, А.Е. Крюков^{5e}¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия³ Уральский государственный университет путей сообщения, ул. Колмогорова, 66, Екатеринбург, Россия⁴ Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение Трансэнерго, филиала ОАО РЖД, ул. Октябрьская 2/1, Новосибирск, Россия⁵ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c em@nppem.ru, ^d fesakilya@yandex.ru, ^e appleforevor@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0000-0002-0937-1030>, ^d <https://orcid.org/0009-0000-3993-3818>,^e <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 12.01.2026, принята 14.01.2026

Объекты электрифицированных железных дорог являются мощными источниками электромагнитных полей, оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье персонала, экологическую обстановку и надёжность работы электронного оборудования. Для снижения электромагнитных влияний систем тягового электроснабжения на смежные линии электропередачи (ЛЭП) и линии связи могут применяться различные мероприятия, рациональный выбор которых в условиях масштабной цифровизации электроэнергетики должен базироваться на применении компьютерного моделирования. В статье представлены результаты моделирования наведённых напряжений, создаваемых трёхфазной тяговой сетью на смежные ЛЭП. В частности, рассматривалось влияние на отключенную ЛЭП 10 кВ, расположенную вблизи тяговой сети. При моделировании применялась концепция описания системы тягового электроснабжения в фазных координатах, которая реализована в программном комплексе Fazonord AC-DC. Результаты моделирования показывают, что трёхфазная тяговая сеть по сравнению с однофазной создаёт значительно меньшие наведённые напряжения основной частоты на отключенной смежной ЛЭП. Таким образом, применение трёхфазной системы тягового электроснабжения позволяет обеспечить лучшие условия электромагнитной безопасности персонала. Разработанная методика является универсальной и позволяет определять наведённые напряжения при любых траекториях сближения тяговых сетей и ЛЭП: параллельных, скрещивающихся, пересекающихся. Кроме воздушных ЛЭП могут рассматриваться линии связи, кабели и другие протяжённые металлические конструкции – например, трубопроводы, в том числе расположенные под землёй.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения; трёхфазная тяговая сеть; электромагнитные поля; линии электропередачи; электромагнитные влияния; наведённое напряжение; моделирование.

Modeling of electromagnetic effects of a three-phase traction network on adjacent power transmission lines

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2b}, B.A. Arzhannikov^{3c}, I.A. Fesak^{4d}, A.E. Kryukov^{5e}¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³ Ural State Transport University; 66, Kolmogorov St., Ekaterinburg, Russia⁴ West Siberian Directorate for Energy Supply – a structural division of Transenergo, Branch of Russian Railways JSC; 2/1, Oktyabrskaya St., Novosibirsk, Russia⁵ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c em@nppem.ru, ^d fesakilya@yandex.ru, ^e appleforevor@mail.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,^c <https://orcid.org/0000-0002-0937-1030>, ^d <https://orcid.org/0009-0000-3993-3818>,^e <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 12.01.2026, accepted 14.01.2026

Electrified railway facilities are powerful sources of electromagnetic fields, which have an adverse impact on personnel health, the environment, and the reliability of electronic equipment. Various measures can be used to reduce the electromagnetic impact of traction power supply systems on adjacent power transmission lines (PTLs) and communication lines. A rational choice of these measures, in the

context of large-scale digitalization of the electric power industry, should be based on the use of computer modeling. This article presents the modeling results of induced voltages generated by a three-phase traction network on adjacent PTLs. Specifically, the impact on a disconnected 10 kV PTL located near the traction network is examined. During the modeling, the concept of describing the traction power supply system in phase coordinates is used, which is implemented in the Fazonord AC-DC software package. The modeling results show that a three-phase traction network, compared to a single-phase network, creates significantly lower induced fundamental frequency voltages on a disconnected adjacent PTL. Thus, the use of a three-phase traction power supply system ensures improved electromagnetic safety for personnel. The developed method is universal and allows for the determination of induced voltages for any traction network and power transmission line approach path: parallel, crossing, or intersecting. In addition to overhead power transmission lines, communication lines, cables, and other extended metal structures, such as pipelines, including those located underground, can be considered.

Keywords: traction power supply systems; three-phase traction network; electromagnetic fields; power lines; electromagnetic influences; induced voltage; modeling.

Введение и обзор литературы. В настоящее время проблема защиты электротехнического персонала от воздействия наведённых напряжений приобретает особую значимость [1]. Для снижения электромагнитных влияний (ЭМВ) высоковольтных и многоамперных линий электропередач (ЛЭП) на смежные ЛЭП и линии связи применяются различные мероприятия [2], рациональный выбор которых в условиях масштабной цифровизации электроэнергетики должен базироваться на применении компьютерного моделирования [3].

Вопросы определения наведённых напряжений (НН) на воздушной ЛЭП при использовании заземлителей и компенсаторов рассмотрены в [4]. Коридор ЛЭП с распределёнными параметрами представлен эквивалентной моделью, также предложены мероприятия по снижению ЭМВ. Подтверждена эффективность применения активных компенсаторов на отключенной ЛЭП вместо повторных заземлений. Определена мощность компенсатора для синтеза этих устройств.

Задача моделирования наведённых напряжений, создаваемых тяговой сетью 25 кВ на линиях, питающих источники электрического освещения железнодорожных станций, решена в [5]. Показано, что величины НН могут превышать допустимые уровни. Для их снижения предлагается разделение ЛЭП на отдельные участки.

Результаты исследования ЭМВ ЛЭП-500 кВ на воздушную линию (ВЛ) 35 кВ представлены в [6]. Показано, что ЭМВ ЛЭП-500 кВ могут привести к повышению напряжения ВЛ-35 кВ выше допустимых пределов. Особо опасные НН имеют место при однофазном коротком замыкании (КЗ) ЛЭП-500 кВ.

Вопросы влияния электромагнитного поля (ЭМП) тяговой сети на работу объектов железнодорожного транспорта рассмотрены в [7]. Описаны средства снижения ЭМВ на электротехническое оборудование. Результаты разработки средств противодействия наведённым напряжениям на распределительных ЛЭП, расположенных вблизи линий сверхвысокого напряжения (СВН), представлены в [8]. Показано, что в одних коридорах с ЛЭП СВН часто проходят распределительные ВЛ среднего напряжения; при этом на проводах этих ВЛ выведенных в ремонт, могут возникать опасные для персонала НН. Для расчёта ЭМВ ЛЭП СВН использовался программный продукт ЕМТР (Electromagnetic Transients Program). Предложено новое устройство для снижения наведённых напряжений, обеспечивающее безопасность обслуживающего персонала.

Результаты численного моделирования наведённых напряжений на отключенной цепи двухцепной ВЛ 220 кВ

приведены в [9]. Разработанное программное обеспечение позволяет определить напряжения, возникающие вследствие электрического и магнитного влияния работающей цепи ВЛ. Метод определения параметров ЛЭП с помощью наведённого напряжения предложен в [10]. Показано, что такой подход обеспечивает погрешность, не превышающую 10 %, что подтверждено на основе инструментальных измерений.

Исследование наведённого напряжения на грозозащитных тросах (ГЗТ) гибридных ЛЭП 500 кВ постоянного (DC) и переменного (AC) тока в режимах плавки гололёда проведено в [11]. Показано, что наличие транспозиции ЛЭП AC позволяет эффективно снижать наведённое напряжение на ГЗТ. Анализ факторов, влияющих на наведённое напряжение в двухцепных ЛЭП, выполнен в [12]. Исследован механизм электромагнитной связи двухцепных ЛЭП 500 кВ. Показано, что протяжённость ЛЭП оказывает значительное влияние на наведённый ток, но меньшее на НН. Транспозиция проводов позволяет снижать НН и повышать безопасность персонала.

Результаты моделирования НН на ЛЭП 500 кВ, расположенной в районе интенсивного образования гололёда, приведены в [13]. Показано, что напряжение электрического влияния уменьшается с увеличением толщины стенки гололёда. Результаты расчётов могут использоваться для разработки мероприятий по обеспечению безопасности электротехнического персонала.

Результаты исследования НН в двухцепных ЛЭП представлены в [14]. Определено оптимальное время повторного включения ЛЭП. Анализ НН в обесточенной цепи двухцепной ЛЭП проведён в [15]. Для моделирования использовалось программное обеспечение ЕМТР. В результате моделирования выявлены факторы, влияющие на наведённые напряжения и токи. Результаты анализа показали, что длина линии, расстояние между токоведущими частями, уровень напряжения и удельное сопротивление грунта оказывают значительное влияние на наведённые напряжения и токи.

Результаты расчёта НН на низковольтных воздушных линиях электропередачи приведены в [16]. Показано, что вблизи этих линий, смонтированных в городах, могут быть расположены высокие здания. При ударе молнии в такое здание электромагнитное поле может вызвать высокие НН на низковольтных ЛЭП. Получено уравнение для расчёта НН, а также проведён анализ влияния параметров на наведённое напряжение.

Результаты измерения параметров четырёхцепных ЛЭП при наведённом напряжении представлены в [17]. Для определения параметров многоцепных ЛЭП необ

ходимо измерять импедансы разомкнутой цепи при различных режимах работы. Однако наведённое напряжение может достигать десятков тысяч вольт, что может привести к повреждению измерительного оборудования. Авторами предложен метод, обеспечивающий снижение НН до безопасного уровня. Обобщённая модель для расчёта наведённого напряжения на оболочке кабеля описана в [18]. Результаты моделирования показали, что для треугольного расположения проводов погрешность расчёта НН не превышает 6,5 %. При плоском расположении погрешность достигает 5 %.

Алгоритм расчёта НН в линиях связи, вызванных током КЗ во влияющей ЛЭП, предложен в [19]. Представлена модель для определения НН. Представленные численные примеры подтвердили достоверность расчётов путём сравнения с аналитическими результатами. Анализ НН на грозозащитных тросах одноцепной ЛЭП выполнен в [20]. На основе Matlab было проведено численное моделирование ЭМП в окрестности расположения ГЗТ, а в Comsol Multiphysics была построена модель для конечно-элементного моделирования, которая позволила получить распределение напряжённости вокруг ЛЭП. Результаты моделирования НН в ГЗТ ЛЭП 1000 кВ приведены в [21]. Наведённые напряжения при различных способах заземления ГЗТ рассчитывались с помощью программного обеспечения ЕМТР, изучалось влияние расположения ГЗТ на НН.

Оценка наведённого напряжения на отключенной ЛЭП, вызванного электромагнитным воздействием тяговой сети (ТС) 25 кВ однопутной железной дороги, дана в [22]. Расчёты проводились для различных вариантов заземления линии с учётом изменения положения локомотива на железнодорожном пути. Для этой цели использовалось программное обеспечение ЕМТР, позволяющее моделировать линии электропередачи и тяговые сети с использованием их фактических параметров. Программный комплекс для оценки индуктивного напряжения на обесточенных линиях электропередачи, вызванного электромагнитным воздействием ТС, представлен в [23]. Приведены результаты расчётов НН, выполненные с учётом экспериментальных данных по токам в ТС. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Модель для вычисления помех, создаваемых ТС 25 кВ на рельсовых цепях (РЦ), предложена в [24]. На её основе проведено определение помех от наведённого переменного тока в рельсах с учётом конструктивных особенностей и электрических параметров РЦ, а также конкретных значений проводимости рельс-земля. Анализ электромагнитных связей между ТС и подземным трубопроводом в многослойном грунте выполнен в [25]. Представлены результаты исследований НН на расположенном рядом с ТС подземном трубопроводе. Параметры грунта определялись на основе измерений, что позволило реализовать модель грунта, состоящего из шести слоев. Взаимные импедансы рассчитывались с использованием метода конечных элементов и сравнивались с модифицированной версией уравнения Карсона, в которой член, описывающий проводимость грунта, заменён эквивалентом для многослойной структуры.

Результаты моделирования и анализа электромагнитной обстановки в тяговой сети представлены в [26]. На основе теории многопроводных ЛЭП реализована математическая модель ТС в нормальных условиях работы и при КЗ контактного провода и рельса. Приведены расчёты электромагнитного поля промышленной частоты, генерируемого ТС вдоль рельсов. Исследования факторов, влияющих на индуцированный ток в ТС метрополитена, выполнены в [27]. Реализована модель ТС метрополитена, которая была проверена на основе частотно-временных характеристик, проанализированы факторы, влияющие на наведённые напряжения и токи.

Анализ представленных публикаций позволяет сделать следующие выводы:

1. Наведённые напряжения, создаваемые ЛЭП и ТС на смежных линиях электропередачи и связи, а также на других проводящих конструкциях, могут приводить к тяжёлым электротравмам обслуживающего персонала, поэтому проблема их снижения имеет высокую актуальность.

2. В современных условиях выбор мероприятий по снижению НН должен проводиться на основе компьютерного моделирования.

3. Для определения ЭМВ ЛЭП и ТС на смежные линии электропередачи и связи в основном используются универсальные программные системы Matlab и ЕМТР.

4. Методы и средства, позволяющие определять наведённые напряжения, создаваемые трёхфазной тяговой сетью, в рассмотренных публикациях не представлены.

Для моделирования ЭМВ трёхфазных ТС можно эффективно использовать подход, предложенный в [28–30] и реализованный в программном комплексе Fazonord AC-DC, разработанном в ИрГУПСе. Ниже приведены результаты моделирования наведённых напряжений, создаваемых трёхфазной ТС [31] на отключенной ЛЭП 10 кВ.

Методика и результаты моделирования. Для определения наведённых напряжений, создаваемых трёхфазной тяговой сетью [31], использовалась методика, основанная на мультифазном моделировании [28, 29], отличающаяся от описанных выше подходов следующими особенностями:

- вычисление НН осуществлялось на основе моделирования режимов системы тягового электроснабжения (СТЭ) при движении поездов по трассе с реальными планами и профилями пути;

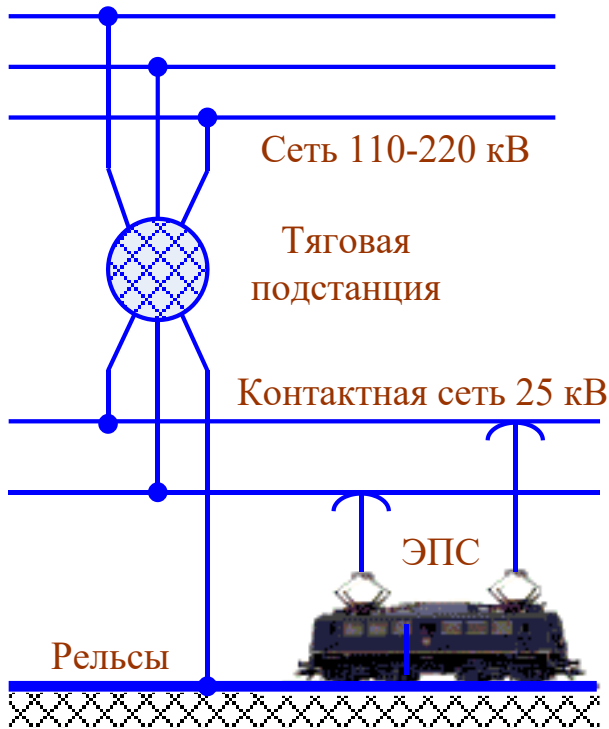
- расчёты выполнялись на основной и частотах высших гармоник, генерируемых выпрямительными электровозами;

- для расчёта НН, вызванных магнитным влиянием трёхфазной сети, использовался подход, обеспечивающий корректное определение взаимных индуктивностей для ближней, промежуточной и дальней зон интеграла Карсона [32];

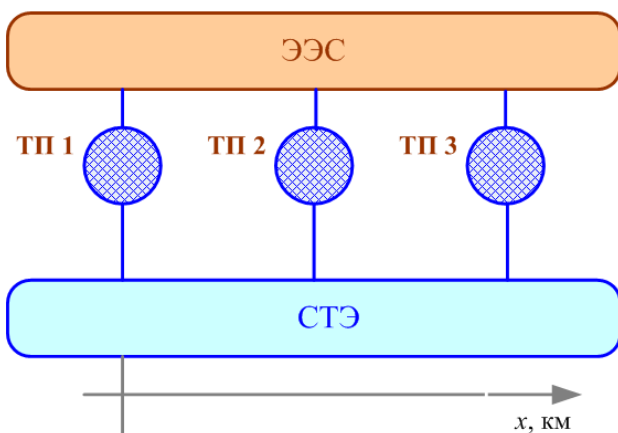
- в состав расчётной схемы включалась модель внешней сети ЭЭС, питающей тяговые подстанции (ТП).

Такой подход позволяет рассматривать силовые элементы с числом фаз, равным 1, 2, 3, 4, 6, 12 и моделировать мультифазные сети, включающие следующие сочетания фаз элементов 1-3; 2-3, 3-4, 3-6, 3-12, 3-4-1, 3-6-1, 3-12-1.

Моделирование осуществлялось в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC [28, 29] для схемы СТЭ, показанной на рис. 1. Для сравнения выполнено моделирование однофазной СТЭ 25 кВ типовой конструкции. В состав расчётных моделей ТС добавлена отключенная воздушная линия 10 кВ, присоединенная на ТП 2 к заземляющему устройству с сопротивлением растеканию, равном 1 Ом. Координаты токоведущих частей ТС представлены на рис. 2. Для контроля наведённых напряжений межподстанционная зона между ТП 1 и ТП 2 была разбита на пять участков по восемь километров каждый.

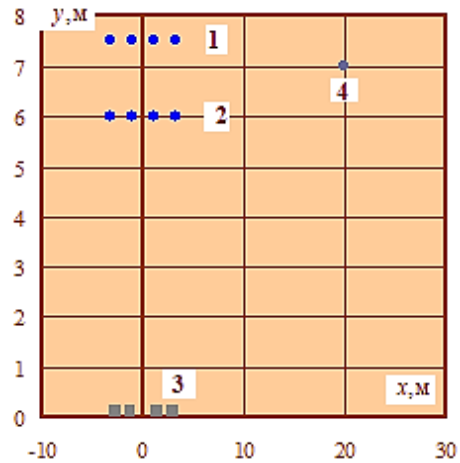


а)

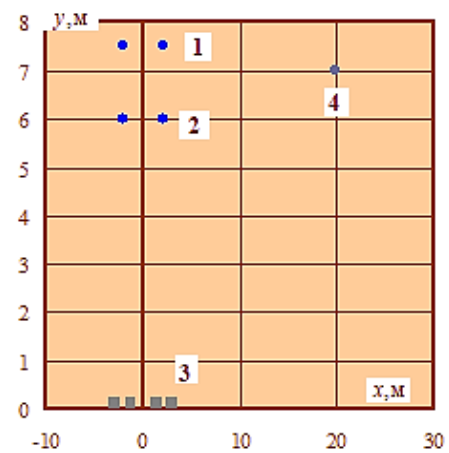


б)

Рис. 1. Схемы моделируемого объекта: а – принципиальная схема трёхфазной СТЭ; б – схема моделируемого участка



а)

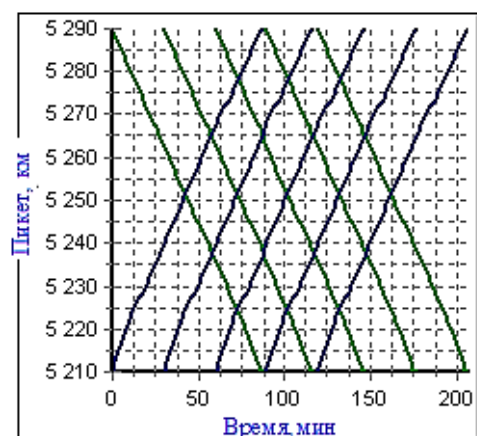


б)

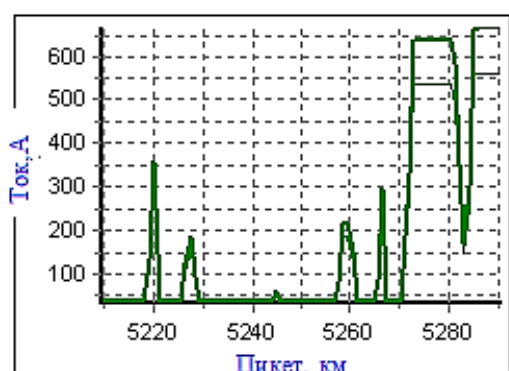
Рис. 2. Координаты токоведущих частей: а – трёхфазная СТЭ; б – однофазная СТЭ; 1 – несущие тросы; 2 – контактные провода; 3 – рельсы; 4 – провод ЛЭП, подверженной электромагнитным влияниям ТС

Тяговые нагрузки создавались на основе моделирования движения грузовых поездов по участку железной дороги с реальным планом и профилем пути. График движения в виде зависимостей $S = S(t)$ показан на рис. 3, а, где S – расстояние, а t – время. На рис. 3, б, в приведены зависимости активных и полных токов, потребляемых электровозами, от расстояния S . В нечётном направлении (с востока на запад) шли составы массой 4384 т, в чётном (с запада на восток) проходили поезда массой 6780 т. Межпоездной интервал задан равным 30 минутам.

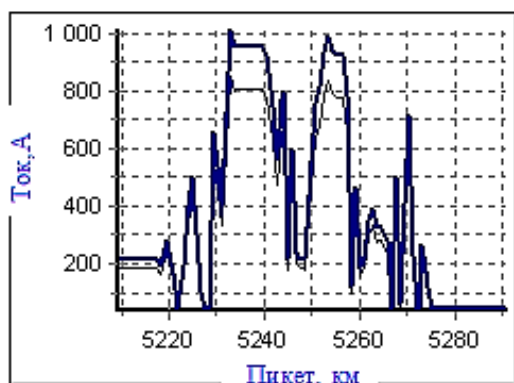
Результаты моделирования приведены в табл. 1 и на рис. 4–9. Табл. 1 подтверждает одно из основных преимуществ трёхфазной СТЭ перед однофазной, заключающееся в практическом отсутствии несимметрии на шинах 220 кВ тяговых подстанций. Следует отметить, что для однофазной СТЭ коэффициенты несимметрии увеличиваются в 27...75 раз и на шинах ТП 3 выходят за допустимые пределы.



а)



б)



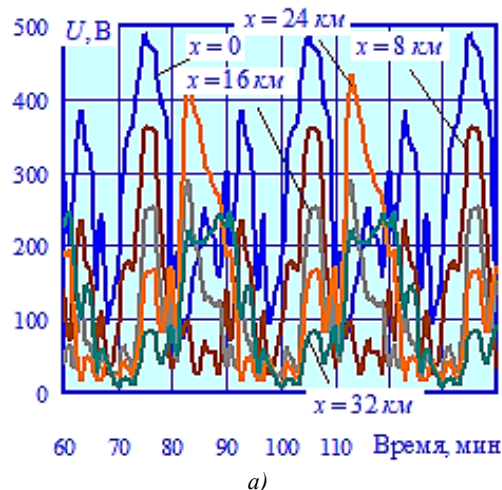
в)

Рис. 3. График следования грузовых составов по участку железнодорожной магистрали (а) и зависимости потребляемых локомотивами токов от расстояния (б), (в): б – нечётный поезд массой 4384 т; в – чётный поезд массой 6780 т

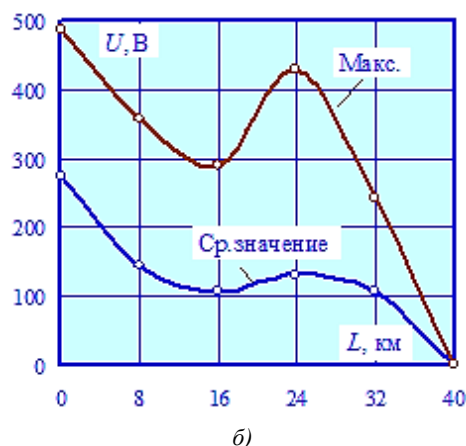
Таблица 1. Коэффициенты несимметрии k_{2U} на шинах 220 кВ ТП, %

Тяговая подстанция	Трёхфазная СТЭ		Однофазная СТЭ		Отношение	
	Ср. значение	Макс.	Ср. значение	Макс.	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{5}$
ТП 1	0,02	0,05	0,59	1,36	29,5	27,2
ТП 2	0,02	0,05	1,22	3,21	61	64,2
ТП 3	0,02	0,06	1,5	4,05	75	67,5

На рис. 4, а показаны графики зависимостей наведённых напряжений основной частоты U_1 от времени t . НН фиксировались в точках, отвечающих координатам x , равным: 0, 8, 16, 24, 32 км. Они были рассчитаны для трёхфазной СТЭ. Ввиду малости НН в заземлённой точке при $x = 40$ км напряжение в ней на графике не представлено. На рис. 4, б приведены зависимости максимальных и средних значений НН от расстояния L до питающей подстанции ЭЭС, определённого по трассам соответствующих ЛЭП. Представленные результаты свидетельствуют о резко переменном характере зависимостей $U_1 = U_1(t)$, вызванном вариациями тяговых нагрузок. При средних значениях U_1 , лежащих в диапазоне 106...275 В, стандартное отклонение находится в пределах 80...122 В, что отвечает коэффициенту вариации в 45...89 %. На рис. 5 приведены результаты сравнения трёхфазной и однофазной СТЭ по критерию НН основной частоты. Из представленных на этом рисунке графиков видно, что трёхфазная СТЭ создает значительно меньшие наведённые НН на отключенной смежной ЛЭП. Отношения $\zeta = \frac{U_1^{(1)}}{U_1^{(3)}}$ располагаются в пределах 1,2...2,5, где индекс (1) отвечает однофазной СТЭ, а индекс (3) – трёхфазной.



а)



б)

Рис. 4. Наведённые напряжения U основной частоты, создаваемые трёхфазной СТЭ: а – зависимости $U = U(t)$; б – максимальные и средние значения; L – расстояние от источника питания; $L = x + 30$

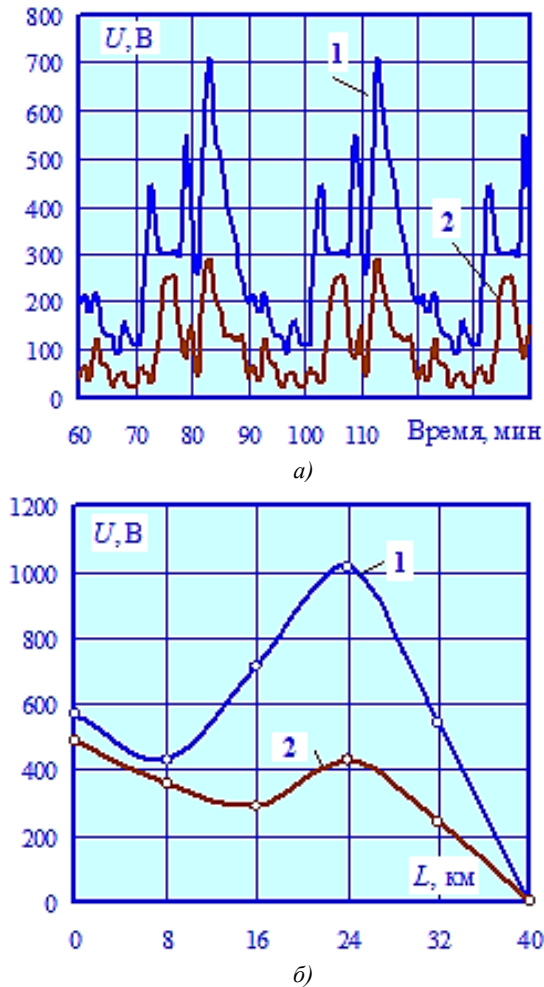


Рис. 5. Сравнение НН основной частоты, создаваемых однофазной (1) и трёхфазной (2) СТЭ: а – зависимости $U = U(t)$ в точке, отвечающей координате x , равной 16 км; б – максимальные значения

Для определения наведённых напряжений с учётом высших гармоник (ВГ), создаваемых электровозами, выполнено моделирование несинусоидальных режимов по методике, описанной в [29]. Спектры гармоник, генерируемых однофазным и трёхфазным электровозами, показаны на рис. 6. Результаты моделирования представлены на рис. 7–9. На рис. 7 приведены зависимости $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$, из которых видно, что величина $\max(U_{\Sigma})$ в трёхфазной СТЭ меньше, чем в однофазной. Кроме того, максимум U_{Σ} трёхфазной СТЭ имеет место при $x = 0$, а в однофазной – при $x = 24$ км.

Зависимости $\max(U_1)$ и $\max(U_{\Sigma})$ от расстояния L для трёхфазной СТЭ представлены на рис. 8. Из него видно, что за счёт ВГ результирующие наведённые напряжения увеличиваются в 1,5...2,8 раза. Результаты сравнения трёхфазной и однофазной СТЭ по критерию U_{Σ} приведены на рис. 9. Из них видно, что неравенство $\max U_{\Sigma}^{(1)} > \max U_{\Sigma}^{(3)}$ нарушается только в одной точке, отвечающей координате $x = 0$. При $x = 8$ км $\max U_{\Sigma}^{(1)} \approx \max U_{\Sigma}^{(3)}$. В остальных точках $\max U_{\Sigma}^{(1)} > \max U_{\Sigma}^{(3)}$

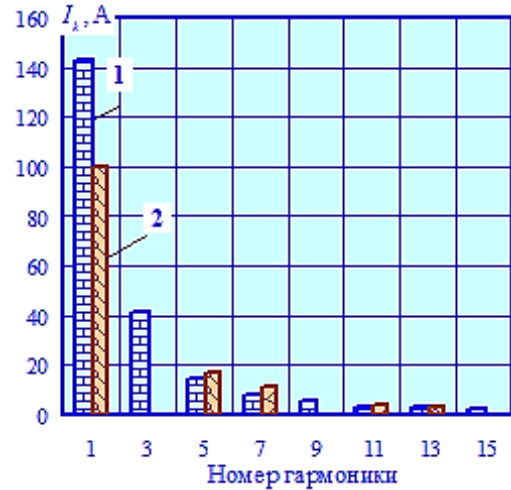


Рис. 6. Спектры гармоник, генерируемых однофазным (1) и трёхфазным (2) электровозами

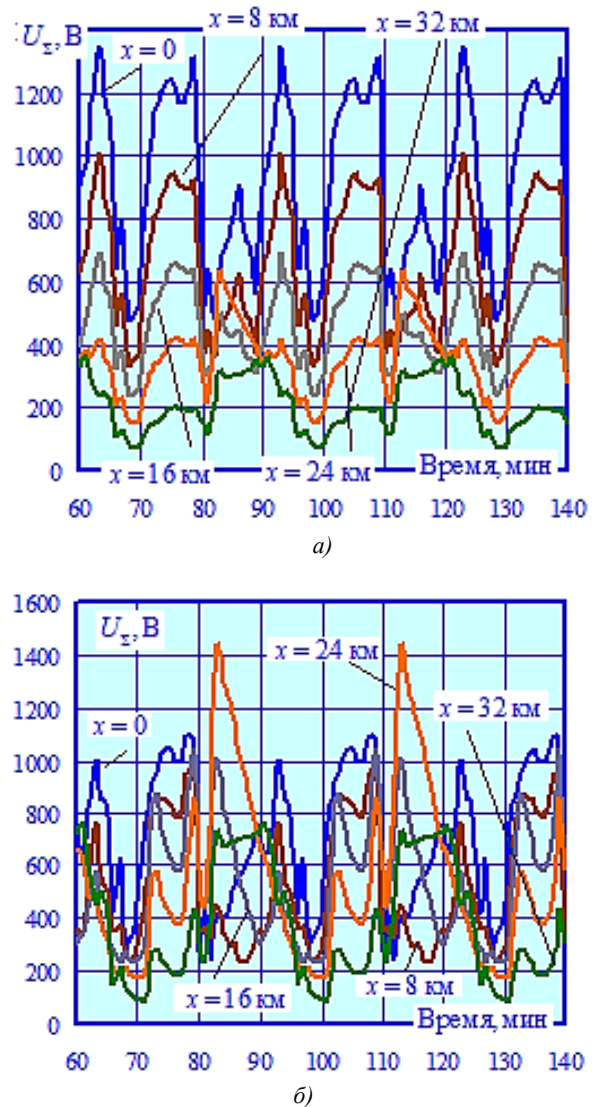


Рис. 7. Результирующие наведённые напряжения, рассчитанные с учётом гармонических искажений: а – трёхфазная СТЭ; б – однофазная СТЭ; $U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + k_U^2}$; U_1 – НН основной частоты; k_U – суммарный коэффициент гармоник

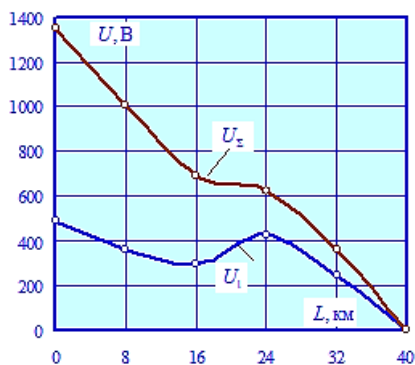


Рис. 8. Зависимости $\max(U_1)$ и $\max(U_\Sigma)$ от расстояния L для трёхфазной СТЭ

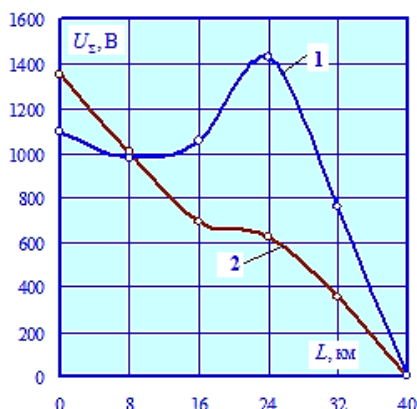


Рис. 9. Зависимости максимальных значений НН от расстояния L : 1 – однофазная СТЭ; 2 – трёхфазная СТЭ

Полученные результаты моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

- зависимости $U_1 = U_1(t)$ и $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$ отличаются значительными вариациями, поэтому адекватные заключения об условиях электромагнитной безопасности

Литература

1. Мисриханов М.Ш., Мирзаабдулаев А.О. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // Электрические станции. № 11. 2008. С. 44–49.
2. Бадёр М.П., Ермоленко Д.В., Куликов А.А. Защита линий продольного электроснабжения от электромагнитного влияния тяговой сети // Электротехника. № 9. 2024. С. 64–70.
3. Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.
4. Селезнев В.Ю., Сбитнев С.А., Шмелев В.Е. Моделирование наведенных напряжений на воздушной линии электропередачи при использовании заземлителей и компенсаторов // Новое в российской электроэнергетике № 5. 2018. С. 6–16.
5. Козменков О.Н., Мавлетшин М.М. Наведённое напряжение в линиях питания систем освещения железнодорожных станций // Вестник транспорта Поволжья. № 3 (105). 2024. С. 29–34.
6. Жудина В.В., Голдобин Д.А. Исследование электромагнитного влияния ВЛ-500 кВ на ВЛ-35 кВ с различным заземлением нейтрали // In Situ. № 11. 2016. С. 20–25.
7. Рыжова Е.Л. Влияние электромагнитного поля тяговой сети на работу объектов железнодорожного транспорта //

персонала, работающего в зонах электромагнитного влияния трёхфазной ТС, можно сделать только на основе моделирования динамических процессов;

- трёхфазная ТС создаёт значительно меньшие наведённые напряжения основной частоты на отключенной смежной ЛЭП;
- в большинстве контролируемых точек линии, подверженной электромагнитному влиянию ТС, соблюдается неравенство $\max U_\Sigma^{(1)} > \max U_\Sigma^{(3)}$; кроме того, величина $\max(U_\Sigma)$ в трёхфазной СТЭ меньше, чем в однофазной.

Таким образом, в трёхфазной СТЭ обеспечиваются лучшие условия электромагнитной безопасности персонала. Для снижения наведённых напряжений могут использоваться методы и средства, описанные в [33].

Заключение. Разработана методика и компьютерные модели, позволяющие определять электромагнитные воздействия трёхфазной тяговой сети, на смежные линии электропередачи. Методика является универсальной и позволяет определять наведённые напряжения при любых траекториях сближения ТС и ЛЭП: параллельных, скрещивающихся, пересекающихся. Кроме воздушных ЛЭП могут рассматриваться линии связи, кабели и другие протяжённые металлические конструкции – например, трубопроводы, в том числе расположенные под землёй. Отличительными особенностями предложенной методики являются: определение тяговых нагрузок на основе моделирования движения поездов по участкам железной дороги с реальными планами и профилями; расчёты ЭМП на основной частоте и частотах высших гармоник; корректный учёт высоковольтной сети питающей ЭЭС; точное вычисление взаимных индуктивностей в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона [32].

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

- V Бетанкуровский международный инженерный форум. Санкт-Петербург, 2023. С. 144–150.
8. Y. He, B. Wei, A. Jiang, L. Wang and Z. Fu. "Study on assessment and countermeasures of induced voltage on distribution lines under EHV/UHV transmission lines" 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014, pp. 1582–1587, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993889.
9. F.D. Surianu, P. Andea, D. Vatau, F. Frigura, C. Barbulescu and I. Borlea "Measurements and Numerical Simulation for Induced Voltages on the 220 kV Double Circuit Overhead Power Line, Having a Passive Circuit" EUROCON 2007 – The International Conference on "Computer as a Tool", Warsaw, Poland, 2007, pp. 2150-2153, doi: 10.1109/EURCON.2007.4400633.
10. Hui Fu, Zhicheng Zhou, Xu Wei and Fengbo Tao "Study on the measurement of power-transmission-line parameters with induced voltage" CICED 2010 Proceedings, Nanjing, 2010, pp. 1–6.
11. Zha Zhi-Peng, Li Zhen-Qiang, Lou Ying, Fan Mian. Study on Overhead Ground Wire Induced Voltage of 500kV AC/DC Transmission Lines for Ice Melting. 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2022.
12. Yuchen Li, Yong Liu, Yi Chen, Xuegang Li, Longji Li, Boxue Du. Calculation and Influence Factor Analysis of Induced Voltage and Current in Double-Circuit Transmission Lines on the

- Same Tower Based on ATP-EMTP. 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). 2025.
13. Xiaoming Wang, Yan Huang, Youqing Yang, Lin Zhang, Xiaolong Bai, Huilin Lu, Lan Yao, Meng Li. Simulation Analysis of Induced Voltage and Current of 500 kV Transmission Line with ICE Area. 2024 5th International Conference on Smart Grid and Energy Engineering (SGEE). 2024.
 14. Ning Du, Bin Han, Zhixuan Gao, Jia Ding. The double-circuit transmission line (DTL) on the same tower needs to Research on Induced Voltage of Transmission Lines and Its Effect on Phase Selection Control Characteristics of Circuit Breakers. 2025 10th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2025.
 15. W. Tian and Z. Cao "Research on Induced voltage and Current in Deenergized Line of Double-Circuit Transmission Lines on the Same Tower" 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, China, 2019, pp. 264–269, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886198.
 16. Can Hu et al. "Calculation on induced over-voltage on low-voltage overhead lines" 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan, 2011, pp. 68–72, doi: 10.1109/PEAM.2011.6134910.
 17. Dali Xiao, Yao Xiao, Xiaoxing Wei, Bingyuan Tan, Jun Deng, Shuai Yan. Parameter Measurement of Four AC Transmission Lines on Same Tower Under High Induced Voltage. 2025 International Conference on New Power System Technology (PowerCon). 2025.
 18. J.E. Guevara, J.S.L. Colqui and J.P. Filho "Generalized Model for Calculating Induced Voltage on the Sheath in Steady-State for Single-Circuit Underground Transmission Lines", 2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Seattle, WA, USA, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/PESGM51994.2024.10761109.
 19. Zou Jun, Chen Hongbo, Yuan Jiansheng, He Jinliang, Zeng Rong and Gao Yanqing "Calculation of transverse voltages of communication lines induced by the fault current of power system" Proceedings. International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002, pp. 1327-1330 vol.2, doi: 10.1109/ICPST.2002.1047617.
 20. X. Mu, J. Guo, J. Li and Q. Sheng "Analysis and Experiment of Electromagnetic Induction on the Overhead Ground Wires of Single Circuit Transmission Line" 2021 International Conference on Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy (ATEEE), Qingdao, China, 2021, pp. 36–40, doi: 10.1109/ATEEE54283.2021.00016.
 21. Y. Sun et al. "Analysis of Induced Voltage of Ground Wires in 1000kV transmission lines" 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961338.
 22. O.V. Zalesova, "Estimation of Induced Voltage on the Dead Overhead Power Line caused by Electromagnetic Influence of the 25 kV AC Electric Railway System" 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934425.
 23. O.V. Zalesova "Program Complex for Estimation of Inducted Voltage on De-energized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System" 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271494.
 24. V. Havryliuk "Model of the Influence of Interference of a 25 kV 50 Hz Traction Network on Parallel 50 Hz Track Circuits" 2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Spokane, WA, USA, 2022, pp. 285–290, doi: 10.1109/EMCSI39492.2022.9889459.
 25. 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.
 26. 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.
 27. Lu Chen, Heli Ni, Jiani Zeng, Xiaoyan Ning, Yujun Guo. Study on the Factors Influencing the Induced Current of Subway Traction Network in the Grid. 2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC). 2023.
 28. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Иркутск : ИрГУПС, 2005. 273 с.
 29. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М. : Директ-Медиа, 2023. 156 с.
 30. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяжённые металлические конструкции. Иркутск, 2022. 189 с.
 31. Моделирование трёхфазных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока / Б.А. Аржанников, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.В. Черепанов, А.Е. Крюков, Д.А. Середкин, И.А. Фесак ; под ред. А.В. Крюкова и Б.А. Аржанникова. Екатеринбург : УрГУПС, 2023. 171 с.
 32. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Syst. Tech. J., 1926, 5, pp. 539–554.
 33. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяжённые металлические конструкции. Иркутск, 2022. 189 с.

References

1. Misrikhanov M.Sh., Mirzaabdulaev A.O. Analysis of the Causes of Accidents and Measures of Protection against Induced Voltage on Overhead Power Lines // Electric Power Stations. No. 11. 2008. pp. 44–49.
2. Badyor M.P., Ermoolenko D.V., Kulikov A.A. Protection of Longitudinal Power Supply Lines from the Electromagnetic Influence of the Traction Network // Electrical Engineering. No. 9. 2024. pp. 64–70.
3. Kosarev A.B., Kosarev B.I., Serbienko D.V. Electromagnetic Processes in AC Railway Power Supply Systems. Moscow: VMG-Print, 2015. 349 p.
4. Seleznev V.Yu., Sbitnev S.A., Shmelev V.E. Modeling of induced voltages on an overhead power line using grounding conductors and compensators // New in the Russian electric power industry, No. 5. 2018. pp. 6–16.
5. Kozmenkov O.N., Mavletshin M.M. Induced voltage in power lines of railway station lighting systems // Volga Region Transport Bulletin. No. 3 (105). 2024. pp. 29–34.
6. Zhudina V.V., Goldobin D.A. Study of the electromagnetic influence of 500 kV overhead lines on 35 kV overhead lines with different neutral grounding // In Situ. No. 11. 2016. pp. 20–25.
7. Ryzhova E.L. Influence of the electromagnetic field of the traction network on the operation of railway facilities // V Betancourt International Engineering Forum. Saint Petersburg, 2023. P. 144–150.
8. Y. He, B. Wei, A. Jiang, L. Wang and Z. Fu "Study on assessment and countermeasures of induced voltage on distribution

- lines under EHV/UHV transmission lines" 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014, pp. 1582–1587, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993889.
9. F.D. Surianu, P. Andea, D. Vatau, F. Frigura, C. Barbulescu and I. Borlea "Measurements and Numerical Simulation for Induced Voltages on the 220 kV Double Circuit Overhead Power Line, Having a Passive Circuit" EUROCON 2007 – The International Conference on "Computer as a Tool", Warsaw, Poland, 2007, pp. 2150–2153, doi: 10.1109/EURCON.2007.4400633.
 10. Hui Fu, Zhicheng Zhou, Xu Wei and Fengbo Tao "Study on the measurement of power-transmission-line parameters with induced voltage" CIGRE 2010 Proceedings, Nanjing, 2010, pp. 1–6.
 11. Zha Zhi-Peng, Li Zhen-Qiang, Lou Ying, Fan Mian. Study on Overhead Ground Wire Induced Voltage of 500kV AC/DC Transmission Lines for Ice Melting. 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2022.
 12. Yuchen Li, Yong Liu, Yi Chen, Xuegang Li, Longji Li, Boxue Du. Calculation and Influence Factor Analysis of Induced Voltage and Current in Double-Circuit Transmission Lines on the Same Tower Based on ATP-EMTP. 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). 2025.
 13. Xiaoming Wang, Yan Huang, Youqing Yang, Lin Zhang, Xiaolong Bai, Huilin Lu, Lan Yao, Meng Li. Simulation Analysis of Induced Voltage and Current of 500 kV Transmission Line with ICE Area. 2024 5th International Conference on Smart Grid and Energy Engineering (SGEE). 2024.
 14. Ning Du, Bin Han, Zhixuan Gao, Jia Ding. The double-circuit transmission line (DTL) on the same tower needs to Research on Induced Voltage of Transmission Lines and Its Effect on Phase Selection Control Characteristics of Circuit Breakers. 2025 10th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2025.
 15. W. Tian and Z. Cao «Research on Induced voltage and Current in Deenergized Line of Double-Circuit Transmission Lines on the Same Tower» 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, China, 2019, pp. 264–269, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886198.
 16. Can Hu et al. "Calculation on induced over-voltage on low-voltage overhead lines" 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan, 2011, pp. 68–72, doi: 10.1109/PEAM.2011.6134910.
 17. Dali Xiao, Yao Xiao, Xiaoxing Wei, Bingyuan Tan, Jun Deng, Shuai Yan. Parameter Measurement of Four AC Transmission Lines on Same Tower Under High Induced Voltage. 2025 International Conference on New Power System Technology (PowerCon). 2025.
 18. J.E. Guevara, J.S.L. Colqui and J.P. Filho "Generalized Model for Calculating Induced Voltage on the Sheath in Steady-State for Single-Circuit Underground Transmission Lines" 2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Seattle, WA, USA, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/PESGM51994.2024.10761109.
 19. Zou Jun, Chen Hongbo, Yuan Jiansheng, He Jinliang, Zeng Rong and Gao Yanqing "Calculation of transverse voltages of communication lines induced by the fault current of power system" Proceedings. International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002, pp. 1327–1330 vol.2, doi: 10.1109/ICPST.2002.1047617.
 20. X. Mu, J. Guo, J. Li and Q. Sheng "Analysis and Experiment of Electromagnetic Induction on the Overhead Ground Wires of Single Circuit Transmission Line" 2021 International Conference on Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy (ATEEE), Qingdao, China, 2021, pp. 36–40, doi: 10.1109/ATEEE54283.2021.00016.
 21. Y. Sun et al. "Analysis of Induced Voltage of Ground Wires in 1000kV transmission lines" 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961338.
 22. O.V. Zalesova "Estimation of Induced Voltage on the Dead Overhead Power Line caused by Electromagnetic Influence of the 25 kV AC Electric Railway System" 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934425.
 23. O.V. Zalesova "Program Complex for Estimation of Induced Voltage on De-energized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System" 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271494.
 24. V. Havryliuk "Model of the Influence of Interference of a 25 kV 50 Hz Traction Network on Parallel 50 Hz Track Circuits" 2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Spokane, WA, USA, 2022, pp. 285–290, doi: 10.1109/EMCSI39492.2022.9889459.
 25. 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.
 26. 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.
 27. Lu Chen, Heli Ni, Jiani Zeng, Xiaoyan Ning, Yujun Guo. Study on the Factors Influencing the Induced Current of Subway Traction Network in the Grid. 2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC). 2023.
 28. Zakaryukin V.P. Complex Asymmetric Modes of Electrical Systems / V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov. Irkutsk, 2005. 273 p.
 29. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC Traction Power Supply Systems Based on Phase Coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 156 p.
 30. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modeling of Electromagnetic Effects of Power Transmission Lines and Traction Networks on Extended Metal Structures. Irkutsk, 2022. 189 p.
 31. Modeling of Three-Phase AC Traction Power Supply Systems for Railways / B.A. Arzhannikov, V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, A.V. Cherepanov, A.E. Kryukov, D.A. Seregin, I.A. Fesak; edited by A.V. Kryukov and B.A. Arzhannikov. Yekaterinburg: Ural State Transport University, 2023. 171 p.
 32. Carson J.R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return // Bell Syst. Tech. J., 1926, 5, pp. 539–554.
 33. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modeling of Electromagnetic Effects of Power Transmission Lines and Traction Networks on Extended Metal Structures. Irkutsk, 2022. 189 p.