

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА СМЕЖНЫЕ УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

В статье исследована возможность совместного функционирования тяговой сети железных дорог переменного тока и смежных устройств, подверженных электромагнитному влиянию, с помощью имитационного моделирования в программах SimInTech и Elcut. При моделировании учтены распределенный характер параметров линий и несинусоидальность питающих напряжений. Полученные в программе SimInTech значения напряжения и тока явились исходными данными для моделирования картины электромагнитного поля в программе Elcut. Приведены результаты моделирования электрического и магнитного полей, которые позволяют оценить интенсивность полей, их напряженности, значения наведенного напряжения в подверженном влиянию объекте. Показаны перспективы научных исследований в области анализа электромагнитных полей, создаваемых тяговой сетью переменного тока при различных режимах ее работы.

Ключевые слова: тяговая сеть переменного тока, электрические железные дороги, имитационное моделирование, электромагнитное поле, напряженность электромагнитного поля, наведенное напряжение.

Для цитирования: Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Исследование влияния тяговой сети железных дорог переменного тока на смежные устройства с помощью имитационного моделирования // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 44–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-44-50. EDN: IPUIKZ.



© Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE INFLUENCE OF AC RAILWAY TRACTION NETWORK ON ADJACENT DEVICES USING SIMULATION MODELING

T. V. Kovaleva, O. O. Komyakova, N. V. Pashkova

Omsk State Transport University, Omsk

The article investigates the possibility of joint operation of the traction network of alternating current railways and related devices subject to electromagnetic influence using simulation modeling in the SimInTech and Elcut programs. The distributed nature of the line parameters and non-sinusoidality of the supply voltages are taken into account during the modeling. The voltage and current values obtained in the SimInTech program are the initial data for modeling the electromagnetic field pattern in the Elcut program. The results of modeling electric and magnetic fields are presented, which allow to estimate the intensity of the fields, their tension, the value of the induced voltage in the affected object. The prospects of scientific research in the field of analysis of electromagnetic fields created by the traction network of alternating current in various modes of its operation are shown.

Keywords: traction network of alternating current, electric railways, simulation model, electromagnetic field, electromagnetic intencion, induced voltage.

For citation: Kovaleva T. V., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Study of the influence of AC railway traction network on adjacent devices using simulation modeling. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 44–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-44-50. EDN: IPUIKZ.



Введение

Эксплуатация существующих энергетических систем требует учитывать условия безопасной работы всех объектов и их электромагнитной совместимости. При работе этой системы возникают электромагнитные поля. Одним из основных нормируемых параметров электромагнитного поля являются его напряженности, превышение пределов которых приводит к нарушению электромагнитной безопасности энергетической системы.

Энергетическая система железных дорог переменного тока представляет собой сложную электрическую цепь, состоящую из элементов с распределенными (высоковольтные линии электропередач, тяговая сеть и др.) и сосредоточенными параметрами (трансформаторы, преобразователи электрической энергии, электроподвижной состав и др.) [1, 2].

В этой системе электромагнитные процессы в значительной степени определяются свойствами элементов с распределенными параметрами, которые приводят к появлению нежелательных стационарных волновых процессов. Нестационарные волновые процессы возникают из-за коммутации оборудования электровозов, входящих как динамическая нагрузка в систему тягового электроснабжения. В результате волновых процессов ухудшается гармонический состав напряжения и тока и, как следствие, условия работы смежных устройств [3].

Высоковольтные линии электропередачи и тяговая сеть электрических железных дорог, как цепи с распределенными параметрами, являются источниками электромагнитного влияния на смежные устройства, находящиеся в непосредственной близости (например, линии связи, железнодорожные устройства сигнализации, централизации и блокировки и т.д.).

В настоящее время так же остро стоит проблема электромагнитной совместимости линий электропередачи и тяговой сети с подвижными электронными и радиоэлектронными средствами (например, беспилотными летательными аппаратами), для которых эти линии являются индустриальными макроисточниками электромагнитных полей [4].

Актуальность этой проблемы связана с потенциальным применением беспилотных летательных аппаратов для диагностирования систем электроснабжения, в том числе элементов контактной сети [5]. Электромагнитные поля, создаваемые тяговой сетью, могут заглушать или искажать спутниковые сигналы, приводя к потере позиционирования или некорректным координатам, вызывать задержки или потерю сигнала при управлении по радиоканалу, а также вызывать сбои в работе бортовой электроники, включая полетный контроллер, датчики и сервоприводы [6–8].

Электромагнитные влияния бывают двух видов: за счет напряжения и тока рабочей частоты и высокочастотные за счет физических эффектов. Диапазон частот электромагнитного влияния составляет от 10 Гц и до 1 ГГц и более. В непосредственной близости к тяговой сети преобладает электромагнитное поле основной частоты, а при удалении от нее — высокочастотное.

Решение задачи электромагнитной совместимости и определение уровней напряженности электрических и магнитных полей может осуществляться с помощью имитационного моделирования.

Цель исследования

Разработка научно обоснованного способа оценки влияния электромагнитного поля от линий переменного тока с учетом их распределенных параметров. Картина электромагнитного поля получена на основе моделирования методом конечных элементов в программе Elcut. В качестве исходных данных использованы результаты динамического моделирования линий в среде SimInTech, при котором была учтена несинусоидальность напряжения в энергетической системе.

Основная часть

Для учета волновых процессов в высоковольтных линиях электропередачи, линиях связи и тяговой сети необходимо учитывать распределенный характер параметров, определяемых на единицу длины.

Тепловые потери энергии в линии обусловлены протеканием токов, а также явлением поверхностного эффекта. Эти потери учитываются при расчетах как активные сопротивления.

Электромагнитное поле, которое возникает под воздействием переменного тока, создает вдоль линии электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции и взаимной индукции между проводами линии. Токи смещения обусловлены емкостной проводимостью между проводами линии и между проводами и землей. На поверхности изоляторов возникают активные токи утечки. При плохих погодных условиях на некоторых участках линий электропередачи высокого напряжения может возникнуть коронный разряд между проводами из-за снижения изоляции воздуха. Перечисленные явления распределены равномерно по всей длине линии и определяют первичные параметры линии. Протяженность линии также оказывает влияние на протекание в ней электромагнитных процессов, так как проявляется необходимость учета конечной скорости распространения этих процессов. Кроме распределенных по длине параметров проводов линий учитываются также распределенные параметры среды.

В качестве объекта исследования обычно рассматривают двухпроводную однофазную однородную линию. Однако высоковольтные линии электропередачи представляют собой трехфазную цепь. Схема замещения элементарного участка трехфазной линии представлена на рис. 1.

Анализ электромагнитных процессов в трехфазной линии передачи может быть проведен с помощью уравнений, составленных по законам Кирхгофа для схемы замещения. Для приведения уравнений для трехфазной линии электропередачи к виду уравнений двухпроводной однофазной линии используется известный алгоритм [9].

Дальнейший расчет напряжения и тока в трехфазной линии электропередачи может проводиться как для модели двухпроводной линии.

Основу математического аппарата для исследования однородных двухпроводных линий представляет система из двух дифференциальных уравнений для тока и напряжения линий, которые известны как телеграфные уравнения:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases}$$

где r_0, L_0, g_0, C_0 — первичные параметры линии.

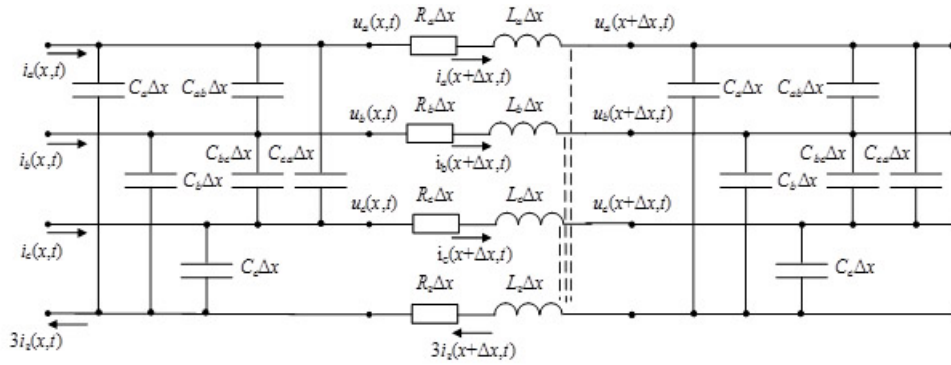


Рис 1. Схема замещения элементарного участка трехфазной линии передачи
 Fig. 1. Equivalent circuit of an elementary section of a three-phase transmission line

При реализации приведенного математического аппарата в среде динамического моделирования SimInTech учтена динамика комплексных моделей виртуальных объектов.

Определение напряжения и тока в любой точке линии при различных режимах ее работы экспериментальным путем затруднительно. В частности, в тяговой сети электрических железных дорог динамической нагрузкой является электроподвижной состав. Электровоз, как сложная нелинейная нагрузка, определяет нестационарные волновые процессы за счет коммутации его оборудования.

Реализация физической модели цепи с распределенными параметрами, имеющей большую длину, в лабораторных условиях не позволяет в полной мере оценить волновые процессы, которые в ней происходят.

Решение задачи определения напряжения и тока в различных точках линии при питании ее синусоидальным и несинусоидальным напряжением можно осуществить с помощью имитационного моделирования системы. В [10, 11] показано, что для решения задачи оценки энергетических параметров системы тягового электроснабжения эффективным средством является программный комплекс SimInTech.

На рис. 2 приведен пример динамического моделирования в среде SimInTech участка тяговой сети с нелинейной нагрузкой в виде движущегося электровоза.

Для тяговых подстанций электроподвижной состав служит генератором высших гармоник тока. Несинусоидальный ток является источником искажения напряжения в различных точках системы электроснабжения.

Отрицательное действие высших гармонических составляющих в основном проявляется в двух видах:

- несинусоидальное напряжение может нарушить работу электродвигателей, конденсаторных батарей, устройств защиты, различных приборов;
- высшие гармоники тока, протекающие по проводам тяговой сети, создают электромагнитное влияние на коммуникации, проложенные вдоль железной дороги.

Несинусоидальность напряжения вызывается высшими гармониками тока преобразователей электровозов и подстанций, которые, протекая по элементам электрической цепи, создают в них потери напряжения.

Для учета несинусоидальности питающего напряжения была разработана модель в среде динамического моделирования SimInTech, в которой

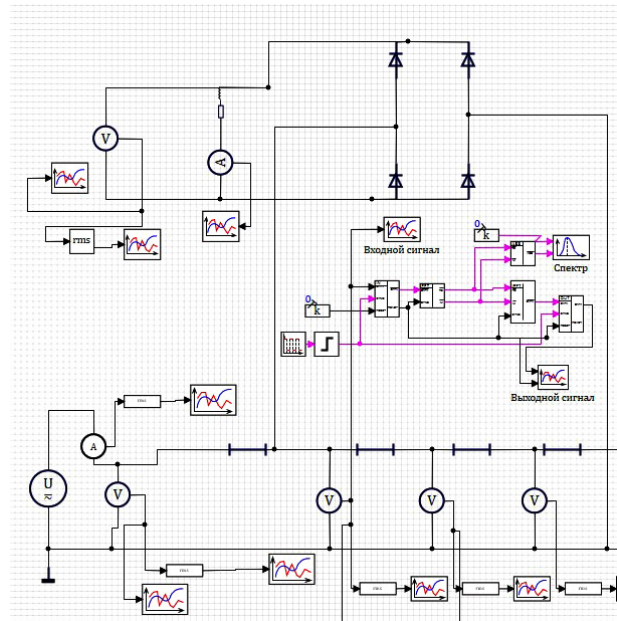


Рис 2. Элемент участка тяговой сети с нелинейной моделью электровоза в среде динамического моделирования SimInTech
 Fig. 2. Element of a traction network section with a nonlinear model of an electric locomotive in the SimInTech dynamic modeling environment

используются источники соответствующих гармонических составляющих ряда Фурье, содержащих массив нечетных гармоник (рис. 3). Действующие значения напряжения гармоник взяты из результатов натурального эксперимента.

В любой точке созданной модели линии можно устанавливать идеальные вольтметры и амперметры, которые фиксируют действующие значения напряжения и тока, а также анализаторы гармонического спектра кривых напряжения и тока. Полученные в результате моделирования в SimInTech значения напряжения и тока в любой точке участка тяговой сети при различных режимах ее работы являются исходными данными для программы Elcut, которая позволяет моделировать и анализировать физические поля, в том числе электромагнитное поле переменного тока.

В программе Elcut можно исследовать отдельные составляющие электромагнитного поля (магнитную и электрическую) на различных частотах.

Магнитное поле, возникающее вокруг проводов тяговой сети из-за протекания тока, сохраняет свою

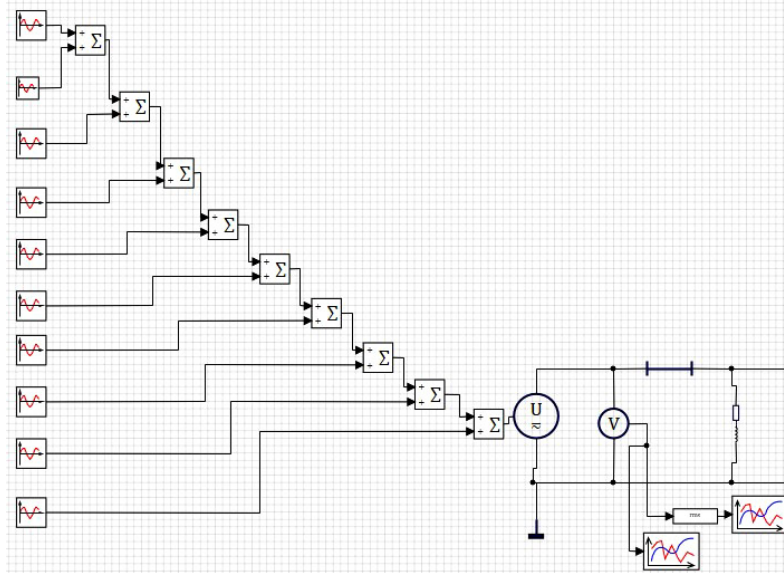


Рис. 3. Модель несинусоидального источника в среде SimInTech
 Fig. 3. Model of a non-sinusoidal source in the SimInTech environment

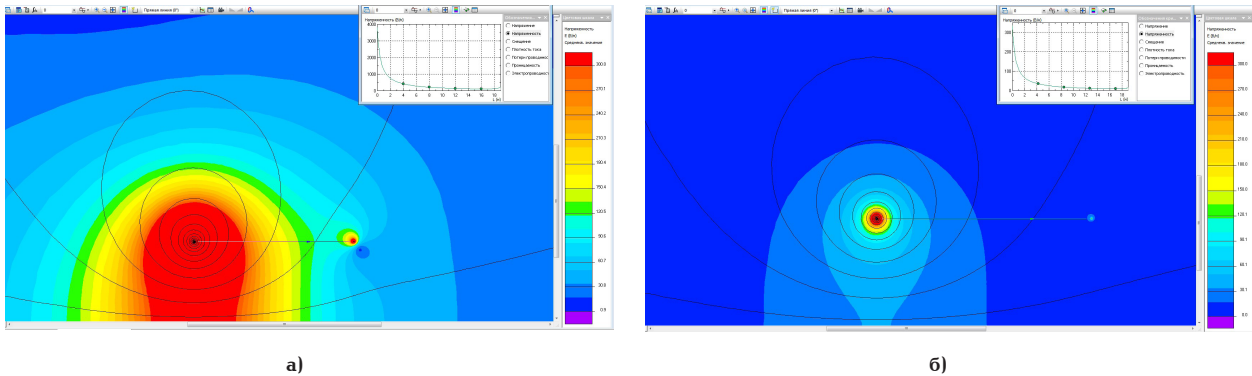


Рис. 4. Результаты моделирования электрического поля в программе Elcut на частотах: а) 50 Гц и б) 250 Гц
 Fig. 4. Results of electric field modeling in the Elcut program at frequencies: а) 50 Hz and б) 250 Hz

интенсивность на значительном расстоянии от нее и зависит от значения тока, типа провода и расстояния до смежных устройств.

Электрическое поле зависит от распределения потенциала на поверхности провода тяговой сети и расстояния до смежных устройств.

Программа Elcut позволяет численно и визуально с помощью цветовой шкалы наблюдать распределение интенсивности электромагнитного поля в заданном радиусе вокруг влияющего провода.

В качестве примера в программе Elcut создана модели магнитного и электрического полей вокруг контактного провода (в приведенной модели взят радиус 30 м) тяговой сети переменного тока 27,5 кВ при двух различных частотах (основной 50 Гц и частоте пятой гармоники 250 Гц). Исходными условиями для моделирования явились значения напряжения и тока тяговой сети, полученные в результате исследования в SimInTech на входе тяговой подстанции при нахождении электровоза в конце межподстанционной зоны. При моделировании в программе SimInTech взяты следующие исходные данные: контактный провод протяженностью 5 км с первичными параметрами $R_0 = 0,21 \text{ Ом/км}$, $L_0 = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$, $C_0 = 17 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$, с динамической нелинейной мостовой нагрузкой, замещающей электровоз [12]. Подверженный влиянию объект может находиться на любом расстоянии

от влияющего провода. В качестве примера рассмотрена изолированная с обеих сторон линия, подвешенная над землей на высоте 10 м. При геометрическом построении модели провода линии создается слой диэлектрика, регулируя электропроводность которого можно учитывать ток утечки варьированием значения относительной диэлектрической проницаемости среды этого диэлектрика.

Зависимости напряженности электрического и магнитного полей от расстояния между влияющим проводом и объектом, подверженным влиянию, приведены на графиках (рис. 4 и 5).

Полученные зависимости подтверждают, что электромагнитные поля, возникающие в нормальных режимах работы линии на низких частотах, на незначительном удалении от источника влияния имеют большую напряженность электрического и магнитного полей.

С увеличением расстояния между влияющим проводом и смежными устройствами интенсивность поля ослабевает, поэтому электромагнитное влияние уменьшается. Программа Elcut позволяет визуально оценить интенсивность поля в соответствии с цветовой шкалой, расположенной на рис. 4 и 5 справа.

С ростом номера гармонической составляющей напряжения в тяговой сети уменьшается его амплитуда, что приводит к уменьшению интенсивно-

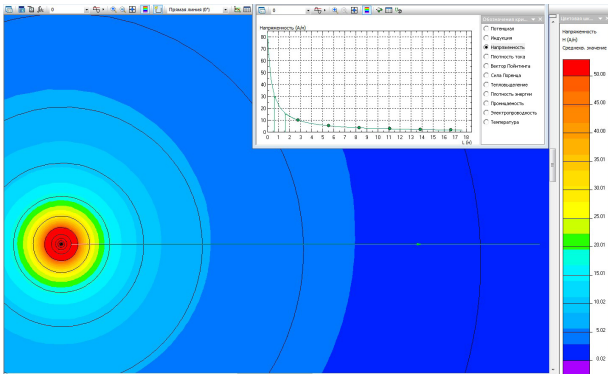


Рис. 5. Результаты моделирования магнитного поля в программе Elcut на частоте 50 Гц
Fig. 5. Results of magnetic field modeling in the Elcut program at a frequency of 50 Hz

сти электрического поля (рис. 4). Для магнитного поля такой зависимости не наблюдается, поэтому на рис. 5 приведены результаты моделирования только на основной частоте.

Электромагнитное влияние на смежные устройства может быть оценено уровнем наведенного напряжения, который является одним из ключевых показателей. На значение наведенного напряжения оказывают влияние различные факторы, в частности частота гармоник напряжений во влияющей линии и параметры, распределенные по ее длине [13].

Наведенное напряжение содержит электрическую и магнитную составляющие. В качестве примера в данной работе определена электрическая составляющая наведенного напряжения, которая обратно зависит от расстояния до влияющей линии, прямо пропорциональна рабочему напряжению влияющей линии и сопротивлению заземления. Эта составляющая не зависит от тока нагрузки, величины напряжения отключенной и не заземленной линии и от расстояния, на котором линии влияют друг на друга. Предельно допустимое значение уровня электрической составляющей наведенного влияющим проводом напряжения на отключенной линии составляет 25 В [14].

На практике измерение наведенных напряжений на отключенных линиях тяговой сети весьма затруднительно, поэтому можно воспользоваться результатами моделирования в программе Elcut. Значения гармоник напряжения влияющего провода (контактного провода тяговой сети) получены в результате моделирования в программе SimInTech с исходными данными, приближенными к реальным условиям функционирования тяговой сети переменного тока 27,5 кВ.

Напряжение гармоник между влияющим проводом и рельсом (моделирование в SimInTech), а также электрическая составляющая наведенных напряжений в отключенной линии, подверженной влиянию, которая находится на удалении от влияющего провода на расстоянии 18 м и 58 м (моделирование в Elcut), приведены в табл. 1.

Как видно из полученных значений, электрическая составляющая наведенного напряжения на любой частоте убывает по мере удаления от влияющего провода. На основной частоте на расстоянии 58 м даже электрическая составляющая наведенного напряжения превышает безопасный уровень, что объясняется небольшим расстоянием между линиями.

Таблица 1. Значения напряжения во влияющей и подверженной влиянию линиях

Table 1. Voltage values in the influencing and affected lines

Частота, Гц				
50 Гц	250 Гц	350 Гц	550 Гц	650 Гц
Напряжение гармоник на влияющем проводе, В				
27500	1346	590	384	311
Напряжение гармоник на подверженном влиянию проводе на расстоянии 18 м, В				
273	47	23	17	14
Напряжение гармоник на подверженном влиянию проводе на расстоянии 58 м, В				
60	11	6	4	3

Заключение

С помощью моделирования в программах SimInTech и Elcut осуществлена возможность рассмотрения совместного функционирования влияющих линий и объектов, подверженных влиянию. Программа SimInTech позволяет учесть распределенный характер параметров однофазных и трехфазных линий различного уровня питающих напряжений, несинусоидальность питающих напряжений и позволяет определить значения напряжения и тока в любой точке линий с учетом стационарных и нестационарных волновых процессов. В программе SimInTech в качестве примера построена динамическая модель энергосистемы, в которую вошли питающая линия электропередачи, тяговая сеть переменного тока напряжением 27,5 кВ и электровоз. Полученные в программе SimInTech значения напряжения и тока явились исходными данными для моделирования картины электромагнитного поля в программе Elcut. Результаты моделирования электрического и магнитного полей позволяют оценить визуально и численно интенсивность полей, их напряженности, значения наведенного напряжения в подверженном влиянию объекте, находящемся в заданном радиусе.

Предложенный способ моделирования в программах SimInTech и Elcut доказал свою работоспособность, так как полученные данные согласуются с результатами опубликованных исследований [7, 8].

Результаты моделирования по предложенной методике позволяют оценить электромагнитную совместимость влияющей линии с различными смежными устройствами и электронными объектами, которые находятся в области влияния электромагнитного поля.

Список источников / References

- Ковалева Т. В., Комяков А. А., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Имитационное моделирование электромагнитных процессов в тяговой сети // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск, 2022. С. 170–176. EDN: PUYGMU.
- Kovaleva T. V., Komyakov A. A., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Imitatsionnoye modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov v tyagovoy seti [Simulation of electromagnetic processes in the traction network]. Pribory i metody izmereniy,

kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte. *Instruments and Methods of Measurement, Quality control and Diagnostics in Industry and Transport*. Omsk, 2022. P. 170–176. EDN: PUYGMU. (In Russ.).

2. Бадер М. П., Ермоленко Д. В., Куликов А. А. Защита линий продольного электроснабжения от электромагнитного влияния тяговой сети // *Электротехника*. 2024. № 9. С. 64–70. DOI: 10.53891/00135860-2024-9-64-70. EDN: LWENNC.

Bader M. P., Ermolenko D. V., Kulikov A. A. Zashchita liniy prodol'nogo elektrosnabzheniya ot elektromagnitnogo vliyaniya tyagovoy seti [Protection of longitudinal power supply lines from the electromagnetic influence of the traction network]. *Elektrotehnika. Electrotechnics*. 2024. No. 9. P. 64–70. DOI: 10.53891/00135860-2024-9-64-70. EDN: LWENNC. (In Russ.).

3. Ковалева Т. В., Комяков А. А., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Анализ волновых процессов в тяговой сети переменного тока на основе имитационного моделирования // *Транспорт Урала*. 2022. № 1 (72). С. 80–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85. EDN: KCIPSY.

Kovaleva T. V., Komyakov A. A., Komyakova O. O., Pashkova N. V. Analiz volnovykh protsessov v tyagovoy seti peremennogo toka na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Analysis of wave processes in alternating current traction power system on the basis of simulation modeling]. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). P. 80–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-80-85. EDN: KCIPSY. (In Russ.).

4. Feliziani M., Campi T., Cruciani S., Maradei F. Chapter 11. Electromagnetic compatibility of automotive WPT systems. *Wireless Power Transfer for E-Mobility*. Academic Press, 2024. P. 361–395. ISBN 9780323995238. DOI: 10.1016/B978-0-323-99523-8.00007-2.

5. Шныптев И. А., Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю. [и др.]. Использование беспилотных летательных аппаратов для определения угла наклона железобетонных опор контактной сети // *Приборы*. 2024. № 5 (287). С. 37–43. EDN: FKGJIN.

Shnyptev I. A., Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Yu. [et al.]. Ispol'zovaniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya opredeleniya ugla naklona zhelezobetonnykh opor kontaktnoy seti [Using unmanned aerial vehicles to determine the angle of inclination of reinforced concrete supports of the overhead contact network]. *Pribory. Instruments*. 2024. No. 5 (287). P. 37–43. EDN: FKGJIN. (In Russ.).

6. Белоусов А. О., Носов А. В. Повышение помехозащищенности беспилотного летательного аппарата в условиях воздействия мощного электромагнитного излучения: комплексный подход // *Системы управления, связи и безопасности*. 2025. № 1. С. 10–47. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047. EDN: OFHGJQ.

Belousov A. O., Nosov A. V. Povysheniye pomekhozashchishchennosti bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyakh vozdeystviya moshchnogo elektromagnitnogo izlucheniya: kompleksnyu podkhod [Enhancing the electromagnetic immunity of the unmanned aerial vehicle under high-intensity electromagnetic radiation: a comprehensive approach]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. Systems of Control, Communication and Security*. 2025. No. 1. P. 10–47. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-1-010-047. EDN: OFHGJQ. (In Russ.).

7. Гизатуллин Р. М., Дроздилов В. А., Константинов Э. С. Моделирование функционирования элементов электронных систем БПЛА при воздействии излучаемых электромагнитных помех высоковольтной линией электропередачи // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2019. № 4 (44). С. 13–21. EDN: PFNVYX.

Gizatullin R. M., Drozdikov V. A., Konstantinov E. S. Modelirovaniye funktsionirovaniya elementov elektronnykh sistem BPLA pri vozdeystvii izluchayemykh elektromagnitnykh pomekh vysokovol'tnoy liniyey elektroperedachi [Modeling the functioning of elements of electronic systems of a UAV under the influence of the radiated electromagnetic interference of a

high-voltage electric transmission line]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2019. No. 4 (44). P. 13–21. EDN: PFNVYX. (In Russ.).

8. Ниязов А. Р., Осипов Д. С., Шепелев А. О. Анализ воздействия электромагнитных полей на безопасность персонала и надежность полетов беспилотных летательных аппаратов при мониторинге линий электропередачи 110 кВ // *Вестник Югорского государственного университета*. 2024. Т. 20, № 1. С. 111–117. DOI: 10.18822/byusu202401111-118. EDN: BJNDHR.

Niyazov A. R., Osipov D. S., Shepelev A. O. Analiz vozdeystviya elektromagnitnykh poley na bezopasnost' personala i nadezhnost' poletov bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri monitoringe liniy elektroperedachi 110 kV [Analysis of the impact of electromagnetic fields on personnel safety and reliability of flights of unmanned aerial vehicles when monitoring 110 kV power lines]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. Yugra State University Bulletin*. 2024. Vol. 20, no. 1. P. 111–117. DOI: 10.18822/byusu202401111-118. EDN: BJNDHR. (In Russ.).

9. Ковалева Т. В., Пашкова Н. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередач // *Известия Транссиба*. 2015. № 2 (22). С. 71–79. EDN: UDYIGN.

Kovaleva T. V., Pashkova N. V. Issledovaniye volnovykh protsessov v kontaktnoy seti i liniyakh elektroperedach [The wave processes study in the overhead system and power lines]. *Izvestiya Trancsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2015. No. 2 (22). P. 71–79. EDN: UDYIGN. (In Russ.).

10. Komyakov A., Tarasevich V., Bartel L. The Effectiveness Evaluation of Automatic Voltage Level Control in the Traction Network of AC Railways. *Proceedings 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 2024. P. 103–107. DOI: 10.1109/UralCon62137.2024.10719010.

11. Komyakov A., Nikiforov M., Tarasevich V., Bartel L. Booster Transformers Energy Performance Assessment in the Traction Power Supply System of Railway Transport. *8th International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*. 2024. P. 3–10. DOI: 10.1007/978-981-97-6934-6_1.

12. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий: справ. Москва: Транспорт, 2001. 512 с.

Normativno-metodicheskaya dokumentatsiya po ekspluatatsii kontaktnoy seti i vysokovol'tnykh vozdushnykh liniy: sprav. [Regulatory and methodological documentation for the operation of a contact network and high-voltage overhead lines]. Moscow, 2001. 512 p. (In Russ.).

13. Залесова О. В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2014. Т. 17, № 1. С. 40–45. EDN: SBMZBH.

Zalesova O. V. Issledovaniye urovnya navedennogo napryazheniya na otklyuchennoy linii elektroperedachi, nakhodyashchaysya v zone vliyaniya tyagovoy seti zheleznoy dorogi peremennogo toka [Research of inducted voltage on disconnected transmission line in the interference zone of AC railway]. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik of MSTU*. 2014. Vol. 17, no. 1. P. 40–45. EDN: SBMZBH. (In Russ.).

14. Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок: Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 903н (ред. от 29.04.2022). Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

Ob utverzhdenii Pravil po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok: Prikaz Mintruda Rossii ot 15.12.2020 № 903n (red. ot 29.04.2022) [On approval of the Rules for labor protection during the operation of electrical installations: Order of the Ministry of Labor of Russia dated 15.12.2020

КОВАЛЕВА Татьяна Владимировна, кандидат тех-
 нических наук, доцент (Россия), доцент кафедры
 «Теоретическая электротехника» Омского госу-
 дарственного университета путей сообщения (Ом-
 ГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 7545-0724

AuthorID (РИНЦ): 650721

ORCID: 0009-0006-2993-5215

AuthorID (SCOPUS): 57486213100

Адрес для переписки: tatevgeniy@list.ru

КОМЯКОВА Ольга Олеговна, кандидат технических
 наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретиче-
 ская электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 1929-6266

AuthorID (РИНЦ): 517522

ORCID: 0009-0006-2806-979X

AuthorID (SCOPUS): 57485174000

Адрес для переписки: komyakovaoo@mail.ru

ПАШКОВА Наталья Викторовна, кандидат техни-
 ческих наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Те-
 оретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 9137-5016

AuthorID (РИНЦ): 650714

ORCID: 0009-0004-9538-7101

AuthorID (SCOPUS): 35389573700

Адрес для переписки: nvp78@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы
 не имеют финансовой заинтересованности в пред-
 ставленных материалах и методах. Конфликт инте-
 ресов отсутствует.

KOVALEVA Tatiana Vladimirovna, Candidate of
 Technical Sciences, Associate Professor, Associate
 Professor of the Theoretical Electrical Engineering
 Department, Omsk State Transport University (OSTU),
 Omsk.

SPIN-code: 7545-0724

AuthorID (RSCI): 650721

ORCID: 0009-0006-2993-5215

AuthorID (SCOPUS): 57486213100

Correspondence address: tatevgeniy@list.ru

KOMYAKOVA Olga Olegovna, Candidate of Technical
 Sciences, Associate Professor, Associate Professor of
 the Theoretical Electrical Engineering Department,
 OSTU, Omsk.

SPIN-code: 1929-6266

AuthorID (RSCI): 517522

ORCID: 0009-0006-2806-979X

AuthorID (SCOPUS): 57485174000

Correspondence address: komyakovaoo@mail.ru

PASHKOVA Natalia Viktorovna, Candidate of
 Technical Sciences, Associate Professor, Associate
 Professor of the Theoretical Electrical Engineering
 Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 9137-5016

AuthorID (RSCI): 650714

ORCID: 0009-0004-9538-7101

AuthorID (SCOPUS): 35389573700

Correspondence address: nvp78@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial
 interest in the presented materials or methods. There is
 no conflict of interest.

The article was submitted 28.05.2025; approved
 after reviewing 15.06.2025; accepted for publication
 25.06.2025.