

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРСОНАЛА И НАДЕЖНОСТЬ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 КВ

Ниязов Артур Ризванович,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: niyazov_1988@mail.ru

Осипов Дмитрий Сергеевич,
доктор технических наук,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru

Шепелев Александр Олегович,
кандидат технических наук,
Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: a_shepelev@ugrasu.ru

Предмет исследования: в данной работе проводится анализ влияния электромагнитных полей на безопасность персонала, а также безопасность и производительность полетов беспилотных летательных аппаратов при эксплуатации линий электропередачи напряжением 110 кВ.

Цель исследования: построение картины электромагнитного поля ЛЭП 110 кВ с целью безопасной эксплуатации персоналом электроустановок, находящихся под напряжением при использовании беспилотных летательных аппаратов.

Объект исследования: электрические сети 110 кВ.

Методы исследования: моделирование допустимых (безопасных) расстояний до токоведущих частей ЛЭП в программе COMSOL Multiphysics.

Основные результаты исследования: построены картины электрического и магнитного полей провода линий электропередачи 110 кВ на расстоянии 1 м от токоведущей части.

Ключевые слова: линии электропередачи, электроустановки, электромагнитные поля, беспилотные летательные аппараты, безопасность персонала.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON PERSONNEL SAFETY AND RELIABILITY OF FLIGHTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES WHEN MONITORING 110 KV POWER LINES

Artur R. Niyazov
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: niyazov_1988@mail.ru

Dmitry S. Osipov
Doctor of Technical Sciences,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru

Alexander O. Shepelev
Candidate of Technical Science, Associate Professor
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: a_shepelev@ugrasu.ru

Subject of research: this paper analyzes the impact of electromagnetic fields on personnel safety, as well as the safety and performance of unmanned aerial vehicle flights in the operation of 110 kV transmission lines.

Purpose of research: building a picture of the electromagnetic field of transmission lines 110 kV and above for the purpose of safe operation of live electrical installations by personnel using unmanned aerial vehicles.

Object of study: 110 kV power grids.

Methods of research: modeling of permissible (safe) distances to live parts of power lines in COMSOL Multiphysics program.

Main results of research: the pictures of electric and magnetic fields of the wire of 110 kV transmission lines at a distance of 1 m from the current-carrying part are constructed.

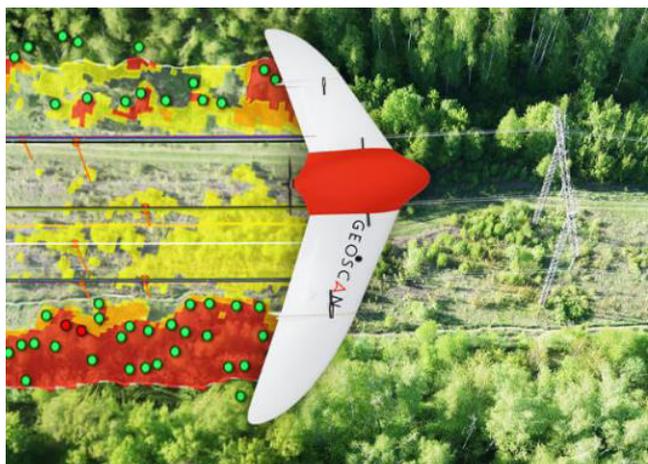
Keywords: power lines, electrical installations, electromagnetic fields, drones, personnel safety.

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии требуют углубленного рассмотрения вопросов безопасности труда, в особенности, в отрасли электроэнергетики, где автоматизированные системы играют ключевую роль в диагностике и обслуживании технологического оборудования. Развитие технологий неизбежно влечет за собой изменения в трудовых процессах и требует постоянного обновления подходов к обеспечению безопасности и здоровья работников. В контексте электротехнических установок и электрических сетей, где электрический ток, высокие напряжения, электромагнитные поля и прочие опасные факторы производственной

среды представляют собой потенциальные опасности, обеспечение безопасных условий труда для обслуживающего персонала, а также надежность полетов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при мониторинге электроустановок становятся особенно актуальными. Требования об обеспечении безопасных условий и охраны труда закреплены в ст. 214 Трудового Кодекса Российской Федерации и являются обязательными для всех работодателей [1].

В настоящее время линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 110 кВ, классифицируемые как питающие и системообразующие, являются неотъемлемой частью энергетической инфраструктуры. Высокие



а)



б)

Рисунок 1. Виды БПЛА: а – самолетного типа; б) – вертолетного типа.

требования к надежности технических элементов ЛЭП, сокращение количества и продолжительности плановых отключений и дополнительные экономические потери, связанные с плановыми и аварийными отключениями, обуславливают необходимость проведения качественного технического обслуживания и ремонта ЛЭП. Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии (Правила) установлены требования к организации и осуществлению технической эксплуатации всех типов электроустановок. Данные Правила распространяются на всех потребителей электрической энергии [2].

БПЛА, учитывая технические преимущества, являются универсальными инструментами для осуществления диагностики электроустановок. Использование БПЛА является эффективным средством для мониторинга электроустановок, в том числе, диагностики состояния элементов ЛЭП. Анализ мировых трендов свидетельствует о том, что область применения БПЛА для выполнения функций мониторинга в отрасли электроэнергетики постоянно расширяется. На сегодняшний день устойчиво формируются предложения по обследованию элементов ЛЭП при помощи БПЛА различных типов. Для диагностики воздушных ЛЭП уже активно используются БПЛА самолетного (рис. 1 а) и вертолетного типа (рис. 1 б) [3].

ЛЭП создают электромагнитные поля (ЭМП) в процессе передачи электроэнергии. ЭМП представляют собой комбинацию электрического поля (ЭП) и магнитного поля (МП), которые взаимодействуют с окружающей средой и влияют на различные объекты, в том числе на человека [4, с. 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

МП возникает вокруг проводов ЛЭП вследствие протекания электрического тока. Интенсивность МП измеряется в амперах на метр (А/м) или теслах (Т) и зависит от силы тока, типа провода и расстояния до ЛЭП. В отличие от ЭП, МП сохраняет свою интенсивность на большем расстоянии от ЛЭП, что может быть важным при анализе воздействия на окружающую среду, оборудование и человека [5, с. 40].

Связь между ротором напряженности МП и плотностью тока в той же точке поле определяется первым уравнением Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \vec{j} – плотность тока проводимости;

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ – плотность тока электрического

смещения.

Первое уравнение Максвелла следует из уравнения полного тока, определяющего количественную связь между циркуляцией вектора \vec{H} по замкнутому контуру и током:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I, \quad (2)$$

где под полным током понимают весь ток (ток проводимости и ток смещения), пронизывающий контур интегрирования.

ЭП создается вокруг проводов ЛЭП, по которым протекает электрический ток. Его интенсивность измеряется в вольтах на метр (В/м) и зависит от напряжения и расстояния

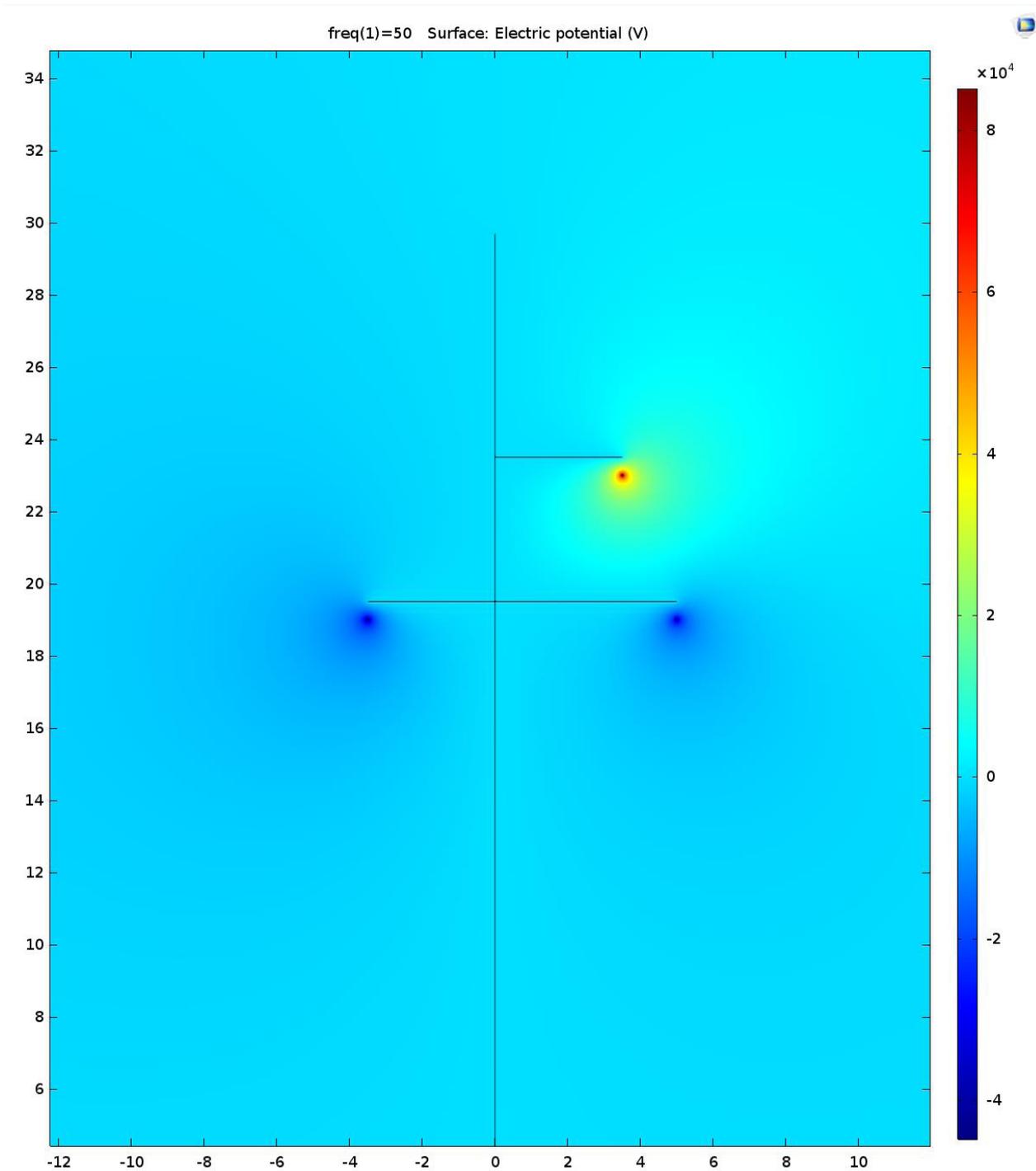


Рисунок 2. Потенциал электрического поля около опоры ЛЭП 110 кВ.

до проводов. ЭП изменяется с расстоянием от проводов и снижается за счет отдаления от ЛЭП. В связи с данными свойствами ЭП, предусмотрены допустимые расстояния до токоведущих частей электроустановок, находящимся под напряжением [5, с. 39].

Связь между ротором напряженности ЭП и скоростью изменения магнитного поля в той же точке поля определяется вторым уравнением Максвелла:

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3}$$

Важно отметить, что интенсивность ЭМП может различаться в зависимости от типа ЛЭП (воздушные или кабельные), уровня напряжения (кВ), типа проводов, режима работы и других технических характеристик. Следует учитывать, что ЭМП могут быть гармоническими и иметь определенную частоту,



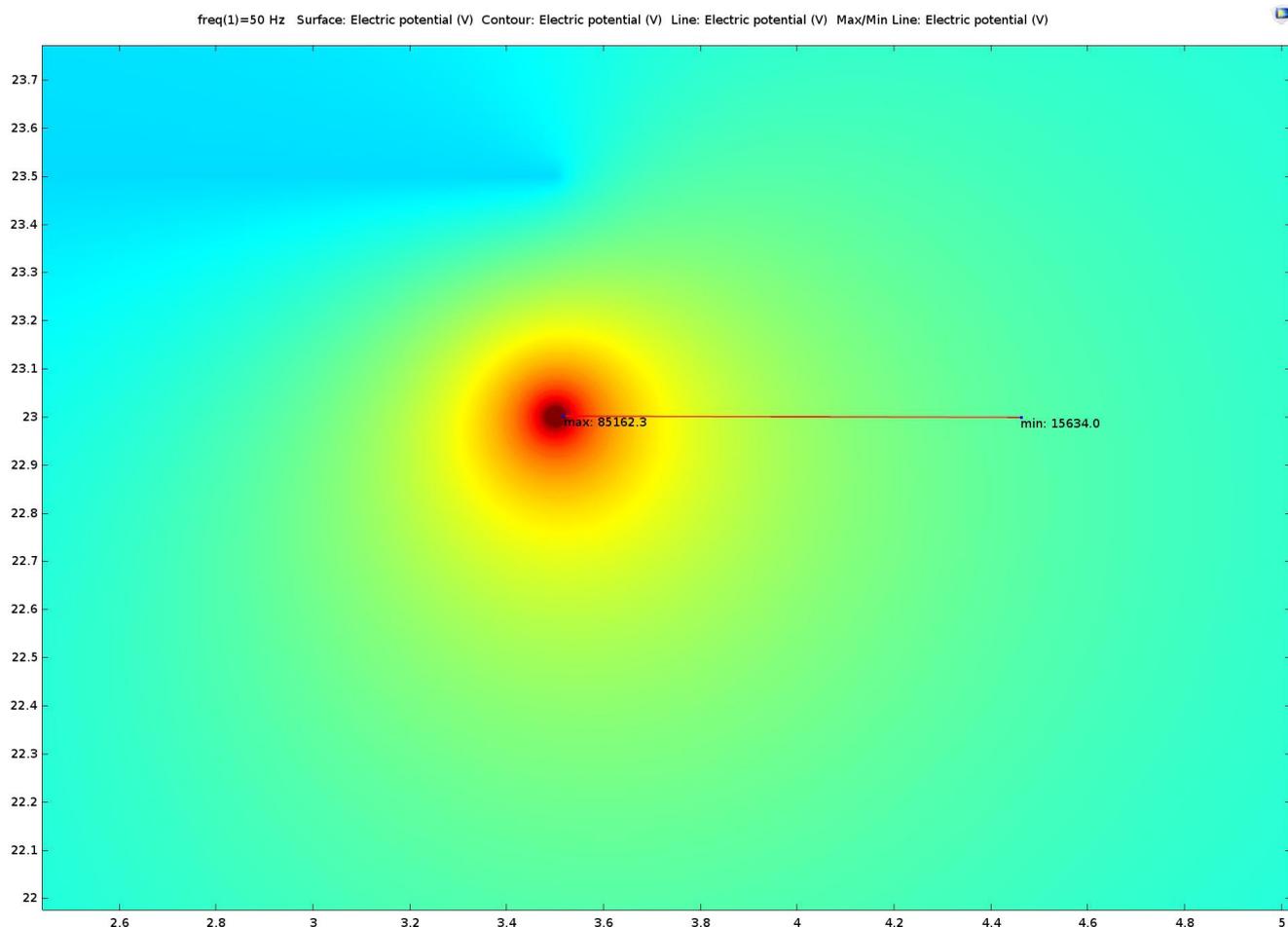


Рисунок 3. Напряженность электрического поля на расстоянии 1 метра от токоведущей части ЛЭП 110 кВ.

которая соответствует частоте переменного тока в системе электропередачи (основная частота 50 Гц или высшие гармоники, кратные основной частоте) [5, с. 43]

Для оценки воздействия ЭМП на человека учеными и практиками проводятся измерения и моделирование. Это позволяет определить уровни экспозиции и разработать стандарты и рекомендации для защиты здоровья людей и ограничения воздействия этих полей. Основные области исследований включают влияние ЭМП на нервную, сердечно-сосудистую и иммунные системы человека, а также органы зрения. Некоторые исследования предполагают, что длительное воздействие ЭМП низкой интенсивности может быть связано с повышенным риском развития некоторых заболеваний, но требуют дополнительных исследований для более точных выводов [4, с. 56].

Учитывая широкое применение БПЛА, при диагностике электроустановок российскими учеными проводятся исследования по построению оптимальной траектории движения для решения задач сбора визуальных

данных о повреждениях ЛЭП, в том числе, при работе БПЛА в зоне влияния ЭМП [6, 7]. Также за рубежом проводятся исследования влияния ЭМП на безопасность и производительность полетов БПЛА [8].

При этом не проводятся исследования по расчетам и построению безопасных (допустимых) расстояний от механизмов, а именно – БПЛА, до токоведущих частей электроустановок, находящихся под напряжением.

В работе [9, с. 14] автор приводит подробную классификацию электромагнитных воздействий (ЭМВ), которым могут подвергаться сами БПЛА при работе вблизи электроустановок, при этом в отношении ЭМВ техногенного или эксплуатационного происхождения отмечены:

- электромагнитные поля высоковольтных линий электропередачи в нормальном режиме и в режиме короткого замыкания;
- электромагнитные поля контактной сети железных дорог в нормальном режиме работы и в режиме короткого замыкания» [9, с. 14].



Таблица 1. Максимальные значения амплитуд напряженностей ЭМП (привод. по [1]).

Параметр	Однофазное КЗ	Двухфазное КЗ	Двухфазное КЗ на землю
E _{max} , кВ/м	2,77	1,455	0,601
H _{max} , А/м	91,26	114,36	121,43

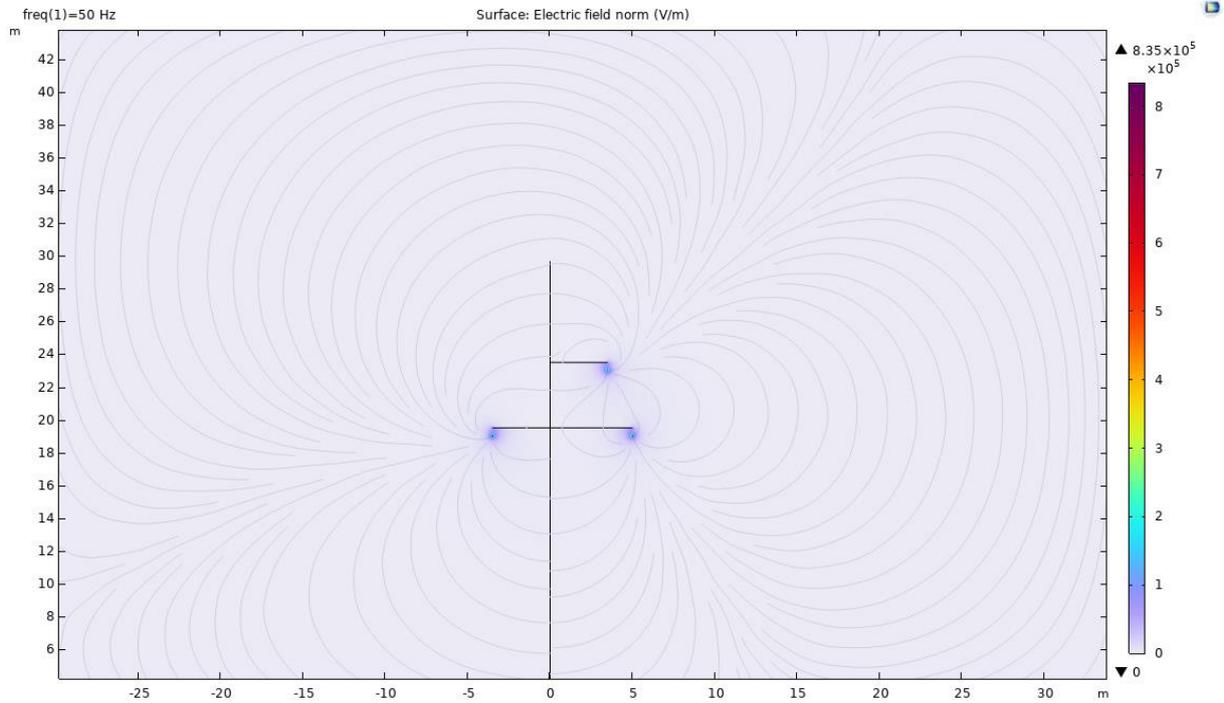


Рисунок 4. Напряженность электрического поля вблизи опоры ЛЭП 110 кВ.

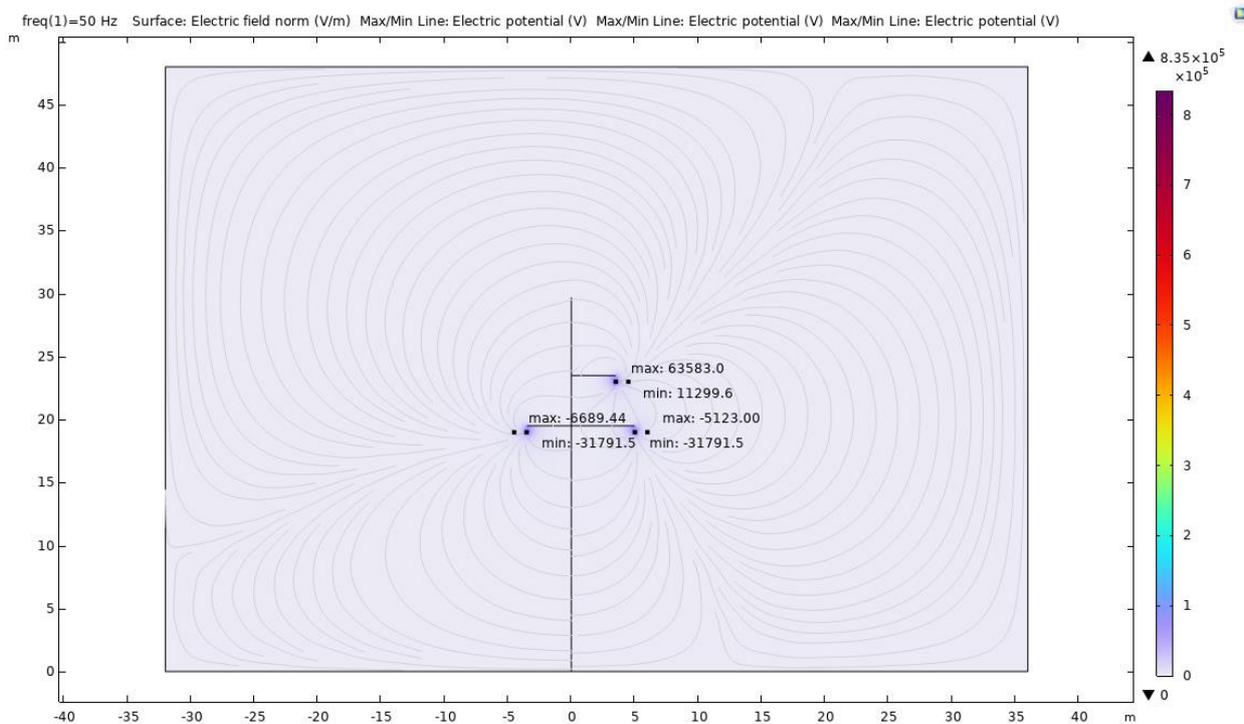


Рисунок 5. Электрический потенциал на расстоянии 1 метра от токоведущих частей ЛЭП 110 кВ.



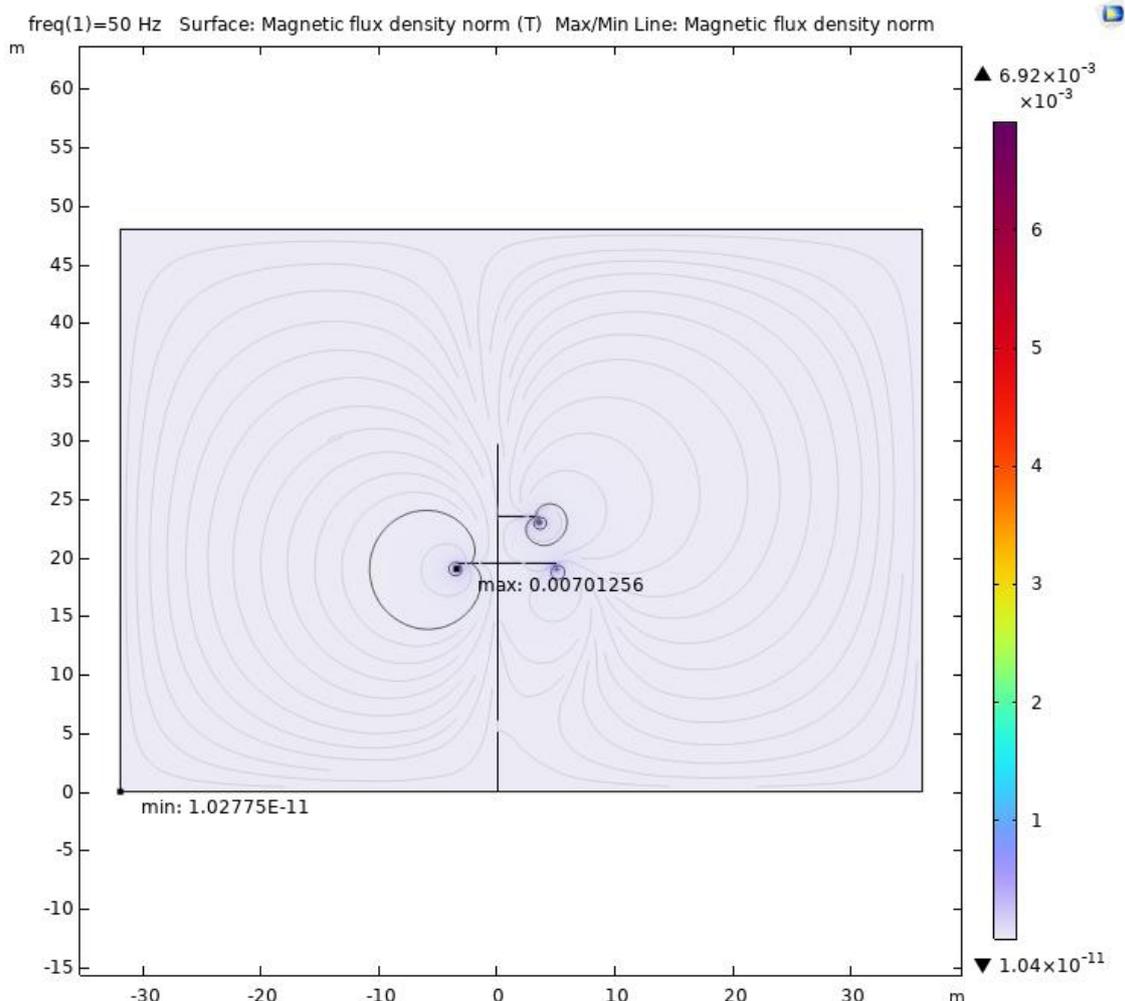


Рисунок 6. Плотность магнитного потока около ЛЭП 110 кВ (с максимальным значением).

Проведем моделирование ЭМП одноцепной ЛЭП 110 кВ. Потенциал фазы А выше, поскольку в моделировании применялись мгновенные значения (рис. 2)

Построим профиль ЭП провода ЛЭП на расстоянии в 1 м согласно допустимых расстояний до токоведущих частей электроустановок, находящихся под напряжением (Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок).

В статье [10] производятся исследования ЭМП при увеличении количества токоведущих частей, при этом авторы фиксируют рост уровней напряженностей, но отмечают отсутствие превышения допустимых значений [10, с. 11].

В работе [11] авторы поднимают вопрос о целесообразности расчета МП для режимов коротких замыканий (КЗ). Продолжительность режима КЗ, определяемая временем отключения устройствами релейной защиты, невелика, однако сопровождается значительными величинами токов, что влияет на возрастание напряженности МП. Результаты

расчетов значений амплитуд напряженностей ЭМП, полученных авторами, представлены в таблице 1 (привод. по [11, с. 335]).

Как следует из таблицы, в режиме коротких замыканий увеличивается напряженность МП. Следует отметить, что при переустройстве воздушных ЛЭП с заменой сталеалюминевых проводов на высокотемпературные возможно увеличение предельных рабочих токов, что также повлияет на напряженность МП.

Проведем моделирование ЭМП одноцепной ЛЭП выполненной проводом марки АС 240/32 с длительно допустимым током 605 А.

Электрический потенциал на расстоянии 1 метра от токоведущих частей составил ~ 11 300 В. Максимальная величина магнитного потока составила 0,007 Тл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. С помощью программного продукта COMSOL Multiphysics было осуществлено моделирование ЭМП одноцепной ЛЭП 110 кВ,

были получены профили напряженности ЭП и плотности магнитного потока.

2. Представлены рекомендации по учету токов аварийных режимов (симметричные и несимметричные короткие замыкания) и токов нормальных режимов при использовании высокотемпературных проводов, поскольку это влечет увеличения напряженности МП.

3. Установлено, что воздействие ЭМП оказывают негативное влияние на окружающую среду, оборудование, а также на организм человека. Требуется разработка нормативно-технической документации по безопасному проведению работ роботизированными системами и БПЛА в зоне влияния ЭМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 25.12.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2024).
2. Приказ Минэнерго России от 12.08.2022 г. № 811 «Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии».
3. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС»: СТО 56947007-29.200.10.235-2016. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов. – Текст: нормативно-технический материал: 2016. – 96 стр.
4. Гичев, Ю. П. Влияние электромагнитных полей на здоровье человека / Ю. П. Гичев, Ю. Ю. Гичев. – Текст: непосредственный // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 1999. – № 52. – С. 1–91.
5. Краинская, И. С. Электромагнитные поля и излучения: учебное пособие / И. С. Краинская. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – 105 с. – Текст: непосредственный.
6. Астапова, М. А. Методика построения траектории беспилотных летательных аппаратов для автономного сбора визуальных данных о повреждениях линий электропередач в инфракрасном и ультрафиолетовом спектрах / М. А. Астапова, И. В. Лебедев, М. Ю. Уздяев. – Текст: непосредственный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 1(40). – С. 27–28. – DOI 10.26102/2310-6018/2023.40.1.003.
7. Шабанова, А. Р. Способ построения безопасных траекторий движения беспилотного летательного аппарата при мониторинге линий электропередач в условиях влияния электромагнитных полей / А. Р. Шабанова, И. М. Толстой, И. В. Лебедев. – Текст: непосредственный // Проблемы региональной энергетики. – 2019. – № 3(44). – С. 17–30. – DOI 10.5281/zenodo.3562201.
8. Electromagnetic Radiation from High-Voltage Transmission Lines: Impact on UAV Flight Safety and Performance / R. Dianovský, P. Pecho, P. Vel'ký, M. Hru'z // Transportation Research Procedia. – 2023. – vol. 75, – pp. 209–218. doi.org/10.1016/j.trpro.2023.12.024.
9. Фомина, И. А. Метод тестирования устойчивости телекоммуникационной системы управления беспилотных летательных аппаратов к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Фомина Ирина Андреевна. – Москва, 2015. – 139 с. : ил. – Текст: непосредственный.
10. Буякова, Н. В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями 25 кВ на многопутных участках / Н. В. Буякова, А. В. Крюков, К. В. Суслов, Д. А. Середкин. – Текст: непосредственный // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 2(54). – С. 3–14.
11. Буякова, Н. В. Электромагнитная безопасность на трассах высоковольтных ЛЭП в режимах несимметричных коротких замыканий / Н. В. Буякова, А. В. Крюков, Д. А. Середкин. – Текст: непосредственный // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: Сб. ст. по материалам международной научно-практической конференции. Севастополь: ФГА-ОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2019. – С. 333–337.