

На правах рукописи



Нгуен Ты

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ И МНОГОАМПЕРНЫХ ЛЭП НА СМЕЖНЫЕ
ЛИНИИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Крюков Андрей Васильевич

Официальные оппоненты: **Сидоров Александр Иванович**

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра «Безопасность жизнедеятельности», заведующий кафедрой

Коркина Елена Сергеевна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел электроэнергетических систем, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет», г. Чита

Защита состоится «08» июня 2021 г. в 09.00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 407, и на сайте: <https://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2021-2/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



Клер Александр Матвеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При проведении работ на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) персонал может быть подвержен воздействию напряжений, наведенных в проводах отключенных ЛЭП электромагнитным полем (ЭМП) работающих линий. Сближение влияющих ЛЭП и линий, подверженных влиянию, может осуществляться по параллельным, сходящимся и сложным траекториям. Величины напряжений могут существенно превышать допустимое правилами безопасности значение 25 В и достигать десятков кВ, что создает опасность поражения персонала электрическим током. По физическому механизму различают электрическое и магнитное влияния. Первое возникает за счет электрического поля влияющей ЛЭП, а второе – вызывается наведением ЭДС в замкнутых контурах переменным магнитным полем.

Величины наводимых напряжений в отключенной и выведенной в ремонт ЛЭП зависят от следующих факторов: режима работы влияющей линии; траектории сближения; ширины сближения a для параллельных линий и размеров коридора сближения для сложных траекторий; схем заземления отключенной воздушной линии (ВЛ); протяженности совместного прохождения влияющей ЛЭП и линии, подверженной влиянию; проводимости грунтов на трассе сближения. Так как наводимое напряжение магнитного влияния пропорционально частоте влияющего тока, возможно существенное возрастание уровня наведенных напряжений на отключенных линиях из-за наличия гармонических искажений во влияющей ЛЭП.

Для расчета наведенных напряжений, вызванных магнитным влиянием, используются аппроксимирующие формулы для ближней и дальней зон, учитывающие сопротивление земли ρ и основанные на интеграле Карсона. Применение этих формул ограничено наличием промежуточной зоны по ширине сближения a (рис. 1) между параллельными или сходящимися линиями, в которой могут возникать большие погрешности при определении наведенных напряжений. Диапазоны a промежуточной зоны зависят от сопротивления грунта.

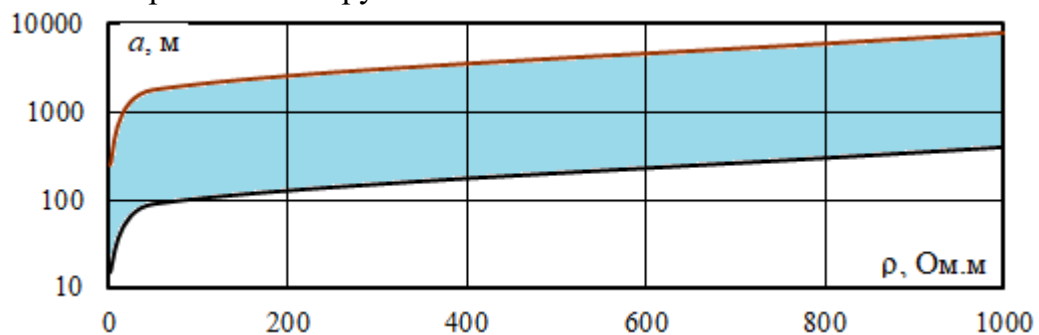


Рис. 1. Диапазоны ширины сближения, отвечающие промежуточной зоне интеграла Карсона для параллельных линий

Таким образом, создание адекватных методов определения электромагнитных влияний высоковольтных и сильноточных ЛЭП на смежные линии имеет несомненную актуальность. В условиях перехода электроэнергетики к цифровым технологиям управления необходимо обеспечить доведение указанных методов до стадии компьютерных моделей, реализованных в программном продукте.

Существенный вклад в решение проблемы моделирования режимов ЭЭС и систем тягового электроснабжения, а также анализа электромагнитной совместимости внесли Аржанников Б. А., Бадер М. П., Берман А. П., Бочев А. С., Быкадоров А. Л., Веников В.

А., Висящев А. Н., Войтов О. Н., Воропай Н. И., Гамм А. З., Герман Л. А., Груздев И. А., Дынькин Б. Е., Жарков Ю. И., Залесова О. В., Идельчик В. И., Карякин Р. Н., Конторович А. М., Котельников А. В., Косарев А. Б., Косарев Б. И., Крумм Л. А., Курбацкий В. Г., Лосев С. Б., Мамошин Р. Р., Марквардт Г. Г., Марквардт К. Г., Марский В. Е., Мельников Н. А., Мирошниченко Р. И., Мисриханов М. Ш., Михайлов М. И., Попов Н. М., Пупынин В. Н., Разумов Л. Д., Сидоров А. И., Совалов С. А., Соколов С. А., Солдатов В. А., Строев В. А., Суворов И. Ф., Тарасов В. И., Тер-Оганов Э. В., Фигурнов Е. П., Цицикян Г. Н., Черемисин В. Т., Чернин А. Б., Шалимов М. Г., Щербачев О. В., Якубович М. В., Abdel-Rahman M. H., Badran E. A., Brameller A., Flavius Dan Surianu, H. W. Dommel, Hongchun Wang, Hongxin Ren, Huiqi Li, J. Szymenderski, K. Budnik, Laughton M.A., Lehtonen M., Mahmood F. Qingjiang Han, Quan Zhou, Rao N.D., Rizk M. E. M., Roy L., Stott B., W. Machczyński, Xin Guo, Yihua Luo их коллеги.

Работы перечисленных авторов создают методологический базис для проведения исследований, направленных на разработку методов и средств, позволяющих определять электромагнитные влияния высоковольтных и сильнотоочных ЛЭП на смежные линии.

Целью исследования заключается в развитии и уточнении методов моделирования режимов электроэнергетических систем, позволяющих определять электромагнитные влияния ЛЭП на смежные линии, адекватно работающие в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона, а также корректно учитывающих все значимые факторы, влияющие на уровни наведенных напряжений.

Для реализации сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести исследования по развитию и уточнению технологии моделирования режимов ЭЭС, обеспечивающей определение наведенных напряжений на смежные ЛЭП в рамках единого алгоритма и позволяющей определять электромагнитные влияния в нормальных и аварийных режимах влияющих ЛЭП;
- разработать компьютерные модели для расчета наведенных напряжений, создаваемых высоковольтными кабелями с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена, компактными ЛЭП повышенной пропускной способности и высокоамперными токопроводами;
- предложить методику определения наведенных напряжений в процессе имитационного моделирования режимов тяговых сетей, включая перспективные ТС повышенного напряжения, при параллельных, сходящихся и сложных траекториях сближения;
- разработать методику учета неоднородности электрических параметров грунтов на трассах сближения при определении наведенных напряжений;
- получить количественные данные, характеризующие техническую эффективность методов уменьшения наведенных напряжений.

Объекты исследования – электроэнергетические системы и системы электропитания железных дорог переменного тока.

Предмет исследования – электромагнитные влияния высоковольтных и сильнотоочных ЛЭП на смежные линии.

Методы исследования рассмотренных в диссертации задач базируются на анализе математических моделей ЭЭС и систем тягового электроснабжения с применением аппарата линейной алгебры, теории функций многих переменных, численных методов решения нелинейных уравнений большой размерности. В качестве основного инструмента для проведения вычислительных экспериментов использовался разработанный в ИРГУПС комплекс программ «Fazonord».

Научная новизна результатов, представленных в диссертации, состоит в разработке нового подхода к определению электромагнитных влияний ЛЭП на смежные линии и включает следующие положения:

- получены новые результаты по развитию и уточнению методик определения наведенных напряжений на смежные ЛЭП, обеспечивающих приемлемую точность расчетов для ближней, промежуточной и дальней зон интеграла Карсона; разработанные методики применимы в нормальных и аварийных режимах влияющих ЛЭП, а также в режимах плавки гололеда на проводах ВЛ;
- разработаны оригинальные компьютерные модели для расчета наведенных напряжений, создаваемых высоковольтными кабелями с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена, компактными ЛЭП повышенной пропускной способности и высокоамперными токопроводами;
- предложена методика определения наведенных напряжений в процессе имитационного моделирования режимов тяговых сетей (ТС), включая перспективные ТС повышенного напряжения, отличающаяся от известных возможностью использования при параллельных, сходящихся и сложных траекториях сближения;
- разработана оригинальная методика учета неоднородности электрических параметров грунтов на трассах сближения при определении наведенных напряжений;
- на основе компьютерного моделирования по разработанным автором моделям впервые получены количественные данные, характеризующие техническую эффективность методов уменьшения наведенных напряжений.

Достоверность полученных в диссертации, обеспечивалась использованием апробированных методов современной теории режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), положенных в основу предлагаемых в работе методов определения электромагнитных влияний высоковольтных и многоамперных ЛЭП на смежные линии. Адекватность применяемых в работе моделей подтвердилась соответствием реальным принципам функционирования ЭЭС, а также согласованностью с результатами, полученными другими авторами и измерениями на реальных объектах.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов диссертационных исследований состоит в разработке положений, обеспечивающих реализацию методов и алгоритмов адекватного определения наведенных напряжений.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они могут применяться для обеспечения электробезопасности при работе персонала в зонах повышенного электромагнитного влияния высоковольтных и многоамперных ЛЭП. С помощью предложенных в работе методов и алгоритмов определения наведенных напряжений можно решать следующие задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации ЭЭС:

- рациональный выбор комплекса средств защиты персонала от наведенных напряжений;
- управление электробезопасностью в электроэнергетических системах.

Реализация результатов работы. Цифровые модели и результаты моделирования электромагнитных влияний, а также практические рекомендации по применению предложенных алгоритмов использованы в научно-исследовательской и проектной деятельности ООО «Транс-Атом» при решении задач по анализу режимов систем электропитания и выработке рекомендаций по повышению электробезопасности.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедрах «Электроэнергетика транспорта» ИрГУПС и «Электроснабжение и электротехника» ИРНИТУ, «Электротехника и электроника» Военно-промышленного колледжа провинции Фу Тхо Социалистической Республики Вьетнам.

Апробация работы. Научные результаты, полученные в процессе диссертационных исследований, обсуждались на следующих научных конференциях: международные научно-практические конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2016, 2017, 2018 гг.); всероссийские научно-практические конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири» (Иркутск, 2017, 2018, 2019 и 2020 гг.); Всероссийских научно-технических конференциях студентов и магистрантов «Молодая мысль – развитию энергетики» (Братск, 2016, 2018); научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Севастополь, 2017); международном научном семинаре «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Иркутск, 2018); II Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (Тольятти, 2019); всероссийской научно-практической конференции «Энергетика в современном мире» (Чита, 2017); всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование: Актуальные исследования и разработки» (Чита, 2019); V Всероссийской конференции «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи» (Челябинск, 2019); международной конференции «Фундаментальные проблемы управления производственными процессами в условиях перехода к индустрии 4.0» (Челябинск, 2020); International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Челябинск, 2020).

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»: п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»; п. 7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем»; п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 28 работах, из них 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.14.02; 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ по смежным специальностям, две статьи, проиндексированные Scopus. В работах, которые опубликованы с соавторами, автору настоящей работы принадлежит от 25 до 33 % результатов. Положения, которые определяют научную новизну и выносятся на защиту, получены автором диссертации лично.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает следующие разделы: введение, четыре главы основного текста, заключение, библиографический список из 129 наименований. Объем диссертации 188 страниц, в тексте содержится 226 рисунков и 52 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи диссертационных исследований, обозначены объект, предмет, методы и средства исследования, представлена новизна, а также теоретическая и практическая значимость основных научных положений.

В первой главе приведена постановка задачи определения взаимных электромагнитных влияний линий электропередачи. При симметричной нагрузке трехфазная ЛЭП является электромагнитно уравновешенной, однако создаваемые ей электромагнитные поля (ЭМП) распространяются в пространстве на значительные расстояния. В несимметричных режимах, вызванных, например, обрывом провода, линия становится электромагнитно неуравновешенной, что приводит к существенному росту напряженностей ЭМП. Поэтому в таких режимах провода отключенной смежной ЛЭП, расположенные на расстоянии десятков метров от оси работающей линии будут находиться в зонах заметного электромагнитного влияния.

Значительные напряженности магнитного поля могут возникать в режимах плавки гололеда, а также при несимметричных коротких замыканиях в трехфазных ЛЭП. Широко применяются электромагнитно неуравновешенные линии, ярким примером которых являются тяговые сети железных дорог переменного тока.

Задача определения электромагнитных влияний смежных ЛЭП и вычисления наведенных напряжений может быть решена в рамках единого алгоритма расчета режимов ЭЭС в фазных координатах, реализованного на базе решетчатых схем замещения (РСЗ), учитывающих индуктивные и емкостные связи всех проводов рассматриваемой многопроводной системы; при этом формируется нелинейная система уравнений

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{X}$ – вектор узловых напряжений в декартовых (U'_k, U''_k) или полярных (U_k, δ_k) координатах; $\mathbf{Y}$ – вектор, включающий активные и реактивные мощности генераторов и нагрузок.

Центральным понятием, на основе которого определяются магнитные влияния, является взаимная индуктивность M_{ik} , которая дает пропорциональную зависимость тока в контуре, создающем магнитное поле, и наводимой в другом контуре ЭДС

$$\dot{\mathcal{E}} = -j\omega M_{ik} \dot{I} l = -\underline{Z}_{ik} \dot{I} l,$$

где $\underline{Z}_{ik}$ – сопротивление взаимной индукции между контурами i и k , отнесенное к 1 км протяженности взаимодействующих проводов длиной l .

РСЗ многопроводной системы формируется на основе выражений для собственных и взаимных сопротивлений отдельных проводов; при этом используется подход Карсона; при этом взаимное сопротивление двух параллельных проводов вычисляется по формуле:

$$\underline{Z}_{ik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{r'_{ik}}{r_{ik}} + \underline{F}_{ik} \right) \quad (2)$$

где ω – круговая частота, с^{-1} ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; r'_{ik} – расстояние между проводом i и зеркальным изображением провода k , м; r_{ik} – расстояние между проводами i и k , м.

Слагаемое $\underline{F}_{ik}$, определяющее добавку из-за конечной проводимости земли, определяется интегралом Карсона. В зависимости от параметра r при вычислении величины $\underline{F}_{ik}$ обычно рассматривают ближнюю ($r \leq 0,25$) и дальнюю ($r \geq 5$) зоны, для которых предложены аппроксимирующие формулы. Параметр рассчитывается так

$$r = r'_{ik} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}.$$

При определении взаимных электромагнитных влияний смежных ЛЭП указанный параметр может находиться в промежуточной зоне, для которой аппроксимирующие

формулы могут приводить к недопустимым погрешностям. В этом случае следует применять разложение интеграла Карсона в ряд, включающий, в некоторых случаях, до 50 членов. Именно такой подход использовался в диссертации при расчете наведенных напряжений.

На практике часто имеет место ситуация непараллельного сближения линий; при этом соотношение (2) записывалось в виде

$$\underline{Z}_{ik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^L \left(\ln \frac{r'_{ik}}{r_{ik}} + \underline{F}_{ik} \right) dz = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} (J_1 - J_2 + \underline{J}_3),$$

где

$$J_1 = \frac{1}{2} \int_0^L \ln [(x_1 + z \operatorname{tg} \beta)^2 + h_{ik}^{'2}] dz; \quad J_2 = \frac{1}{2} \int_0^L \ln [(x_1 + z \operatorname{tg} \beta)^2 + h_{ik}^2] dz; \quad \underline{J}_3 = \int_0^L \underline{F}_{ik}(z) dz;$$

$h_{ik} = h_i - h_k$; $h_{ik}' = h_i + h_k$; h_i, h_k - высоты подвеса проводов i и k .

Первые два интеграла вычисляются аналитически, а третий – целесообразно находить численным интегрированием. Для определения емкостных связей между непараллельными проводами использовался специальный алгоритм, основанный на том, что частичные емкости малых отрезков непараллельных проводов такие же, как и у отрезков проводов, параллельных первому проводу системы и расположенных в середине каждого исходного провода (рис. 2).



Рис. 2. Схема для анализа емкостной связи

Применяемая в работе методика имеет следующие особенности:

- отличается от известных универсальностью, так как позволяет определять электромагнитные влияния в любых, технически реализуемых ситуациях; так, например, в качестве влияющих элементов могут выступать воздушные и кабельные линии различных конструкций, токопроводы и шиннопроводы с массивными шинами, контактные сети железных дорог и др.; перечисленные элементы, а также линии связи могут выступать в качестве объектов, подверженных электромагнитным влияниям;
- на базе методики реализуется системный подход к моделированию наведенных напряжений в связи с тем, что они могут определяться в процессе расчета режимов сложной ЭЭС;
- адекватность определения электромагнитных влияний достигается корректной работой в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона;
- при расчете наведенных напряжений корректно учитываются гармонические искажения токов и напряжений влияющей ЛЭП; возможен учет неоднородности электрических параметров грунтов на трассе сближения влияющей ЛЭП и линии, подверженной влиянию.
- траектория сближения влияющей ЛЭП и линии, подверженной влиянию, может быть параллельной, сходящейся, а также иметь сложную конфигурацию;
- методика позволяет определять техническую эффективность устройств, применяемых для снижения наведенных напряжений, например, экранирующих проводов и отсасывающих трансформаторов.

Во второй главе представлены результаты исследований электромагнитных влияний трехфазных ВЛ типового и компактного исполнения, кабелей и токопроводов. Проведено моделирование нормальных и неполнофазных режимов, а также режимов двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью. Предложены компьютерные модели для расчета наведенных напряжений, создаваемых на смежных ЛЭП при плавке гололеда на влияющей линии. Представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния различий электрических параметров грунтов на уровни наведенных напряжений. Проанализированы электромагнитные влияния однопроводных ЛЭП, реализованных по технологии SWER с использованием земли в качестве обратного провода.

Схемы возможных на практике ситуаций заземления проводов, подверженных электромагнитным влияниям смежных ЛЭП, показаны на рис. 3.

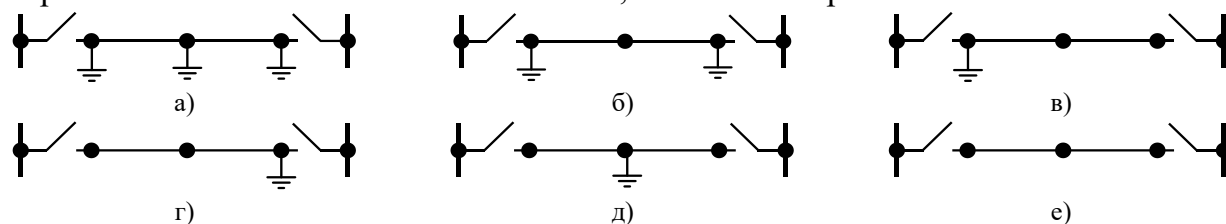


Рис. 3. Ситуации заземления: а – заземление в распределительных устройствах и на месте работ; б – двустороннее заземление; в, г – односторонние заземления слева и справа; д – заземление в месте работ; е – незаземленная линия; месту работ соответствуют средние точки на схемах

Ремонтные работы на двухцепных линиях электропередачи могут проводиться на

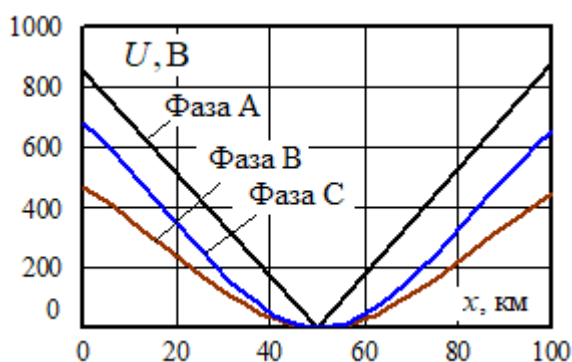


Рис. 4. Зависимости наведенных напряжений от координаты x

отключенной цепи, когда параллельная цепь находится под рабочим напряжением. Для анализа электромагнитных влияний для всех перечисленных на рис. 3 ситуаций была разработана компьютерная модель, реализованная в ПК Fazonord. Для примера на рис. 4 показаны зависимости наведенных напряжений от координаты x оси, направленной вдоль ЛЭП, для ситуации заземления, приведенной на рис. 3 д.

Предлагаемая методика является общей и позволяет определять наведенные напряжения для любых конструкций двухцепных ЛЭП. Отличительная особенность предлагаемой методики заключается в возможности моделирования электромагнитных влияний применительно к конкретному режиму сложной ЭЭС, в составе которой работает анализируемая линия.

В практике эксплуатации ЛЭП используется технология пофазного ремонта ЛЭП; при этом провод, на изоляторах и поддерживающих конструкциях которого выполняются работы, отключается, а передача электроэнергии потребителям осуществляется по двум фазам. Для анализа электромагнитных влияний при пофазном ремонте сформированы компьютерные моде-

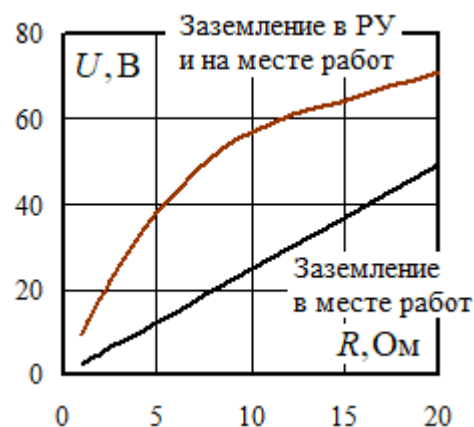


Рис. 5. Зависимости наведенных напряжений от сопротивления заземления на месте работ

ли. Полученные результаты показали, что при сопротивлениях заземлителей $R = 1$ Ом приемлемые уровни наведенных напряжений в месте работ обеспечиваются при ситуациях расстановки заземлений, показанных на рис. 3 а и д. Проанализировано влияние величин R на уровни наведенных напряжений (рис. 5). Результаты моделирования адекватно отражают общие тенденции изменения наведенных напряжений по длине ЛЭП при различных способах заземления отключенной фазы, а также при вариации сопротивления заземления.

Применение предлагаемой методики и программного обеспечения на практике позволит обоснованно подходить к выбору мероприятий по обеспечению безопасности персонала при проведении пофазных ремонтов.

Исследования электромагнитных влияний высоковольтных ЛЭП на отключенные смежные линии проводилось на примере ЛЭП 220 кВ. Рассматривались следующие режимы работы: симметричный нагрузочный; однофазное, двухфазное, трехфазное КЗ и двухфазное замыкание на землю; обрыв и замыкание фазы на землю. Результаты моделирования показаны на рис. 6.

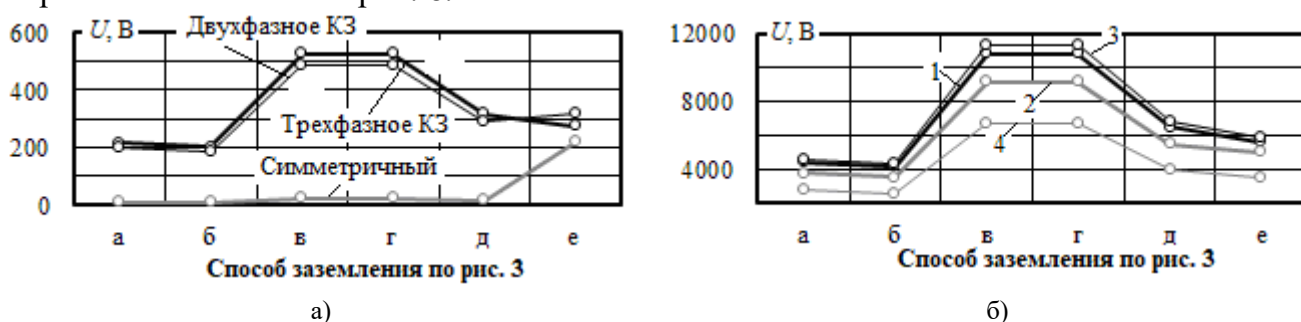
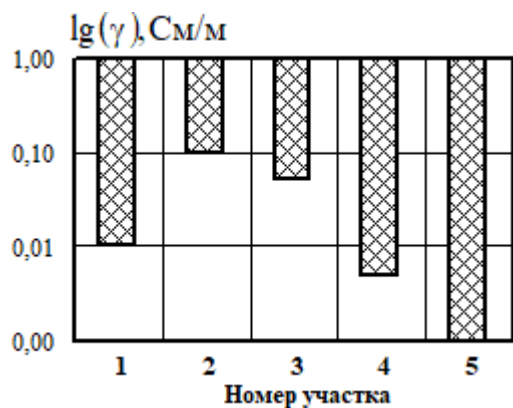


Рис. 6. Максимальные значения наведенных напряжений:

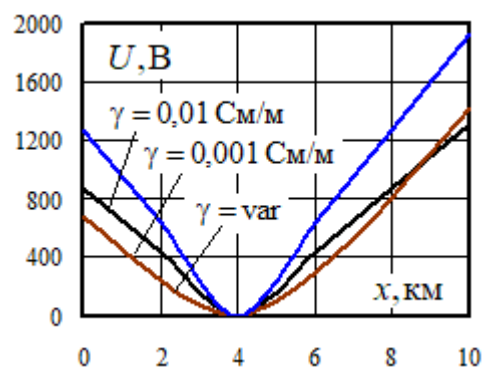
а – режимы с пониженными значениями наведенных напряжений; б – режимы с высокими уровнями наведенных напряжений; цифрами на диаграмме б обозначены: 1 – однофазное КЗ; 2 – двухфазное КЗ на землю; 3 – обрыв и замыкание фазы А на землю на отправном конце ЛЭП; 4 – обрыв и замыкание фазы А на землю на приемном конце линии электропередачи

Результаты работы позволяют разделить рассмотренные режимы на две группы: с пониженными уровнями наведенных напряжений, максимальные значения которых не превышают 600 В (рис. 6 а); с высокими уровнями наведенных напряжений, максимумы которых лежат в пределах 4...11 кВ (рис. 6 б). Предложенные методы и средства моделирования позволяют рассчитывать наведенные напряжения, создаваемые высоковольтными ЛЭП в различных режимах работы, включая вызванные обрывами фаз с одновременными замыканиями на землю. Эта методика может использоваться для выработки мероприятий, обеспечивающих защиту персонала от воздействия наведенных напряжений.

Проведено исследование влияния проводимости грунтов γ на уровни наведенных напряжений. Результаты моделирования представлены на рис. 7. Моделирование проведено для схемы сети, включающей ЛЭП 220 кВ, работающей в неполнофазном режиме. Наведенные напряжения фиксировались на проводе отключенной ЛЭП при ширине сближения 100 м. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: удельное сопротивление грунта оказывает заметное влияние на уровни наведенных напряжений; при различии электрических характеристик грунтов на трассе сближения ее следует разбивать на отдельные участки с индивидуальным заданием параметра γ .



а)



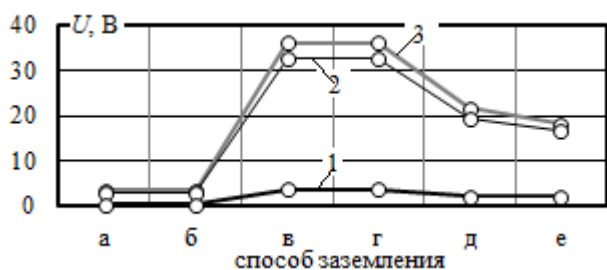
б)

Рис. 7. Влияние сопротивления грунтов на уровни наведенных напряжений:

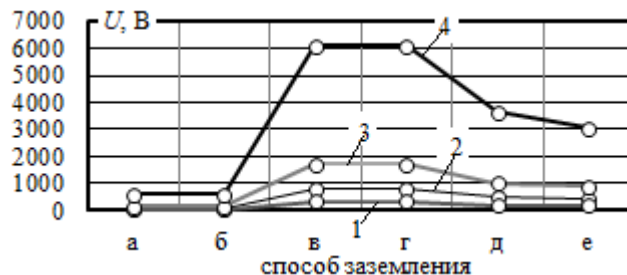
а – проводимости земли по участкам сближения; б – зависимости наведенных напряжений от координаты x при заземлении линии в месте работ

Проведен анализ электромагнитных влияний высоковольтного кабеля 110 кВ с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена на отключенную воздушную линию 10 кВ. Рассматривались следующие режимы работы: симметричный; с различными нагрузками по фазам; неполнофазный при отключении кабеля, присоединенного к фазе А. Кроме того, анализировались режимы следующих коротких замыканий: трехфазное; двухфазное; двухфазное на землю; а также замыкания между жилой и экраном кабеля.

Полученные результаты дают возможность разделить режимы на две группы: с пониженными (рис. 8 а) и высокими (рис. 8 б) уровнями наведенных напряжений. Цифрами на рис. 8 а обозначены: 1 – симметричный режим; 2 – двухфазное КЗ; 3 – трехфазное КЗ; на рис. 8 б: 1 – несимметричный режим; 2 – обрыв одной фазы; 3 – замыкание жилы на экран; 4 – двухфазное КЗ на землю.



а)



б)

Рис. 8. Максимумы наведенных напряжений

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: при симметричной нагрузке, а также в режимах двухфазного и трехфазного КЗ наведенные напряжения

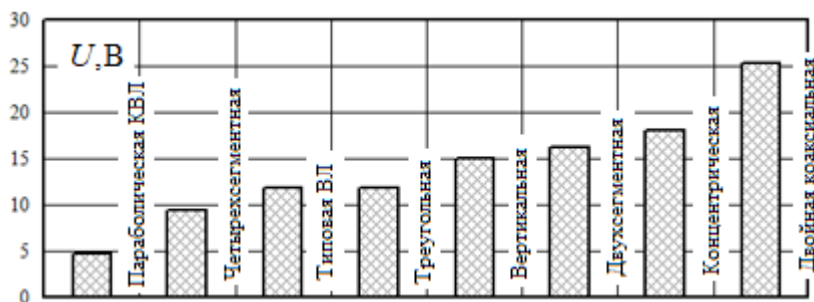


Рис. 9. Максимумы наведенных напряжений

сравнительно невелики и их максимумы не превышают 40 В; наведенные напряжения при замыкании жилы на экран для разных фаз отличаются незначительно; наведенные напряжения в режимах двухфазного КЗ на землю достигают 6 кВ.

Новая технологическая платформа электроэнергетики предполагает применение ком-

пактных воздушных линий (КВЛ) повышенной пропускной способности. Несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию данных линий, вопросы их электромагнитного влияния на смежные ЛЭП оставались не изученными. В работе рассмотрены следующие типы КВЛ 220 кВ: коаксиальные двухсегментные и четырехсегментные; двойная коаксиальная; параболическая; КВЛ с вертикальным, концентрическим и треугольным расположениями проводов.

Полученные результаты дают возможность сделать следующие выводы: конструктивное исполнение ЛЭП оказывает заметное влияние на уровни наведенных напряжений (рис. 9); этот фактор необходимо учитывать при проектировании КВЛ, проходящих вблизи имеющихся линий электропередачи; КВЛ можно разделить на две группы: с пониженным и повышенным электромагнитным влиянием на смежные линии в нормальном режиме. К первой группе относятся следующие КВЛ: коаксиальная четырехсегментная и КВЛ с параболическим расположением проводов; во вторую группу входят: коаксиальная двухсегментная КВЛ; двойная коаксиальная КВЛ; КВЛ с вертикальным, концентрическим и треугольным расположениями проводов; наименьший уровень наведенных напряжений создает параболическая КВЛ, а наибольший – двойная коаксиальная КВЛ.

Одно из направлений технического перевооружения электроэнергетики состоит в разработке и внедрении высокоамперных линий электропередачи, таких как гибкие и жесткие токопроводы, кабели больших сечений с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена, газоизолированные и криогенные линии. Гибкие симметричные токопроводы имеют двухцепное исполнение и расщепленную конструкцию фаз, в которых используются провода больших сечений. Результаты моделирования электромагнитных влияний токопровода на смежную линию позволили сформулировать следующие выводы: в симметричном режиме токопровода наведенные напряжения сравнительно невелики; при незаземленной линии, подверженной влияниям, напряжения провод – земля не превышают 10 В; наибольшие уровни наведенных напряжений наблюдаются в режиме однофазного КЗ; в режимах несимметричных коротких замыканий максимальные значения наведенных напряжений лежат в пределах от 200 В до 10 кВ; поэтому требуются специальные мероприятия по защите персонала, работающего в зонах влияния высокоамперного токопровода; нулевой потенциал достигается при установке в месте работ переносного заземления; при использовании дополнительных заземлений по краям линии уровень наведенного напряжения в этой точке повышается до 516 В при однофазном КЗ, до 35 В при двухфазном, до 25 В при трехфазном и до 325 В при двухфазном КЗ на землю.

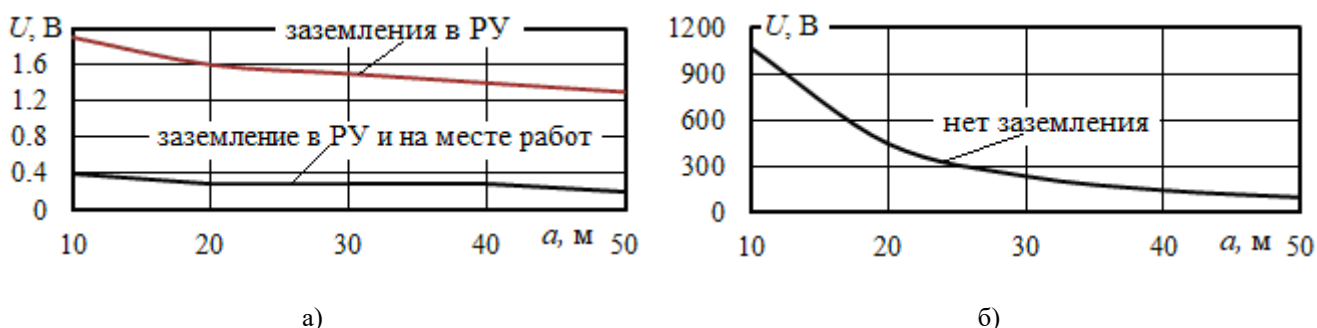


Рис. 10. Зависимость наведенных напряжений от ширины сближения для линии SWER

В сельских электрических сетях иногда применяются трехфазно-однофазные ЛЭП, а для электроснабжения удаленных потребителей используются ЛЭП «провод – земля» (SWER). Результаты моделирования такой ЛЭП, сформированной на основе

трехфазно-однофазных преобразователей по прямой и обратной схемам Штейнмеца, показаны на рис. 10.

Полученные результаты дают возможность сформулировать следующие выводы: при заземлении провода смежной ЛЭП в месте работ обеспечиваются допустимые уровни наведенных напряжений в точке подключения заземлителя; при отсутствии заземлений на проводе смежной ЛЭП фиксируются опасные напряжения, превышающие 1000 В; с увеличением ширины сближения наведенные напряжения снижаются; наибольшая интенсивность снижения наблюдается в ситуации незаземленного провода.

В электрических сетях 6-10-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, могут иметь место двойные замыкания на землю (ДЗЗ), относящиеся к сложным видам повреждений. Процессы при возникновении таких замыканий развиваются в следующей последовательности: происходит однофазное замыкание одной из фаз линии, в результате чего напряжение неповрежденных фаз относительно земли возрастает до линейных значений; длительное воздействие этих напряжений приводит к замыканию другой фазы; при этом пробой изоляции может происходить в точке, удаленной от места первого замыкания. Результаты моделирования электромагнитных влияний при ДЗЗ позволяют сделать следующие выводы: при заземлении в месте работ наведенное напряжение на смежном проводе в этой точке близко к нулю для всех рассмотренных режимов ДЗЗ; при установке заземлений в распределительных устройствах и на месте работ уровни наведенных напряжений в некоторых точках ЛЭП выходят за допустимые пределы; для

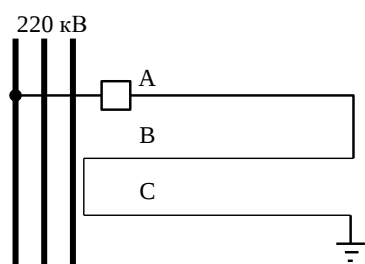


Рис. 11. Схема «змейка»

ситуаций заземлений по вариантам а и б рис. 3 зависимости наведенных напряжений от координаты x имеют максимумы в точках, отвечающих координатам замыканий фаз В или С; различие наведенных напряжений между ДЗЗ фаз А, В и А, С незначительно.

Для устранения гололедных образований на проводах воздушных ЛЭП применяют тепловые методы, получившие название плавка гололеда. Для создания повышенных токов применяют различные схемы, в частности, схема «змейка» (рис. 11). Зависимости наведенных

напряжений при плавке гололеда от координаты x (расстояния до питающей подстанции) по вариантам заземлений, приведенных на рис. 3, при сопротивлениях заземлителей 10 Ом показаны на рис. 12 а, б.

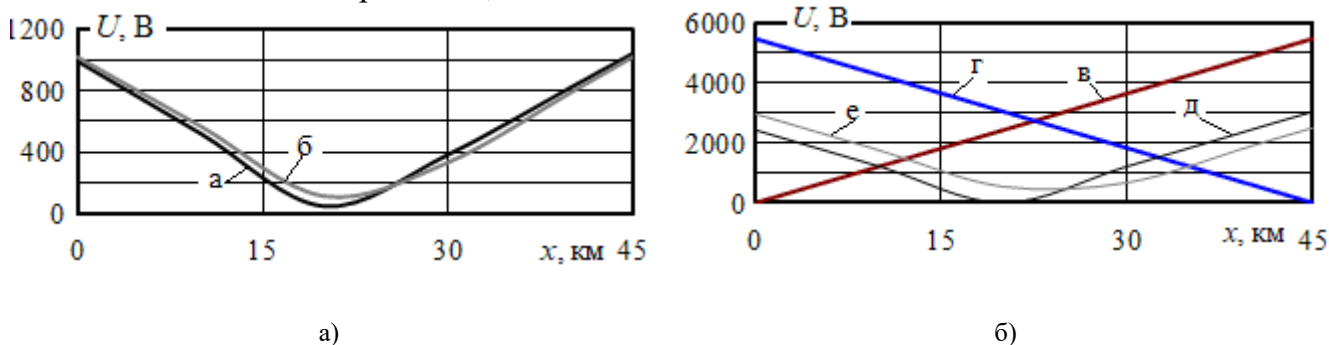


Рис. 12. Зависимость наведенных напряжений от ширины сближения
буквами обозначены способы заземления в соответствии с рис. 3

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: в режиме плавки гололеда на ЛЭП 220 кВ и токах фаз около 780 А наведенное напряжение при заземлении смежной линии в нескольких точках достигало 580 В; при наличии заземления на одном из концов смежной линии напряжения на противоположном конце превышали

5 кВ; при незаземленной линии напряжение на одном из ее концов достигало почти 3 кВ; приемлемый уровень напряжений наблюдается в месте работ при установке там переносного заземления.

Третья глава посвящена разработке методов определения наведенных напряжений, создаваемых на отключенных линиях многоамперными ЛЭП, в качестве которых рассматривались тяговые сети (ТС) железных дорог. Анализировались ТС различного конструктивного исполнения, включая перспективные ТС повышенного напряжения.

Тяговые сети могут наводить значительные напряжения в нормальных эксплуатационных режимах. По сравнению с электромагнитными влияниями трехфазных ЛЭП задачи определения наведенных напряжений, создаваемых тяговыми сетями, отличаются повышенной сложностью. Это связано со следующими факторами: наличием специфических токоведущих частей – рельсов, что требует учета распределенности параметров; перемещением нагрузок в пространстве; значительными уровнями гармонических искажений; реверсированием потоков мощности при осуществлении рекуперативного торможения.

Так как тяговые нагрузки определяются размерами движения поездов, то наиболее эффективный способ преодоления указанных затруднений состоит в использовании имитационного моделирования такого движения. Этот подход обеспечивает высокую адекватность, так как базируется на достаточно достоверной исходной информации о профиле пути, массах поездов и графиках их движения. Величины тяговых нагрузок определяются тяговыми расчетами или экспериментально. Моделирование перемещающихся тяговых нагрузок базируется на задаваемом графике движения.

Для определения наведенных напряжений, создаваемых на смежной ЛЭП тяговыми сетями 25 и 2х25 кВ, моделировалось движение 7 поездов массой 6300 тонн в нечетном направлении и такого же числа поездов массой 6000 тонн в четном. Зависимости составляющих наведенных напряжений от времени в месте работ при ситуации заземления, показанной на рис. 3а, представлены на рис. 13. Ширина сближения принималась равной 20 м.

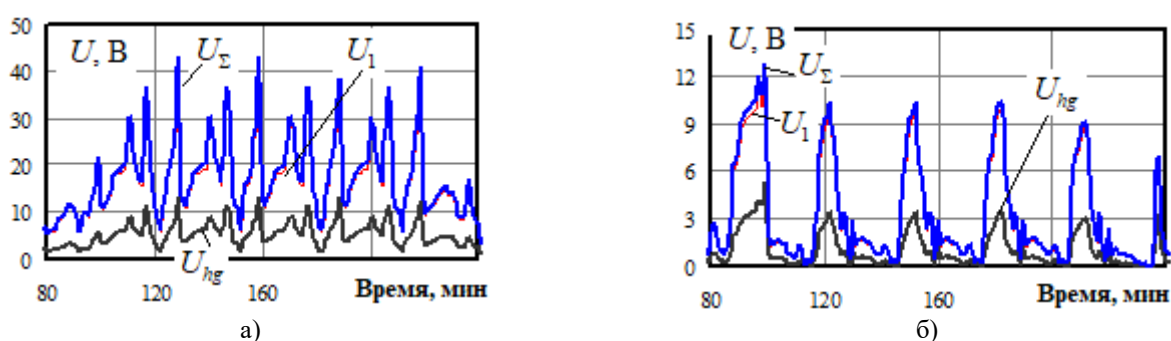


Рис. 13. Зависимости составляющих наведенных напряжений от времени: а – ТС 25 кВ; б – ТС 2х25 кВ;

U_1 – напряжение основной частоты; $U_{hg} = k_U U_1$ – эффективное значение напряжений высших гармоник;

$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + k_U^2}$ – результирующее наведенное напряжение; k_U – суммарный коэффициент гармоник

На рис. 14 представлены зависимости максимумов U_{Σ} при различных способах заземления линии 10 кВ. Сопротивления растеканию заземлителей приняты равными 1 Ом. Ширина сближения а принята равной 100 м. Буквами на рис. 14 обозначены способы заземления в соответствии с рис. 3.

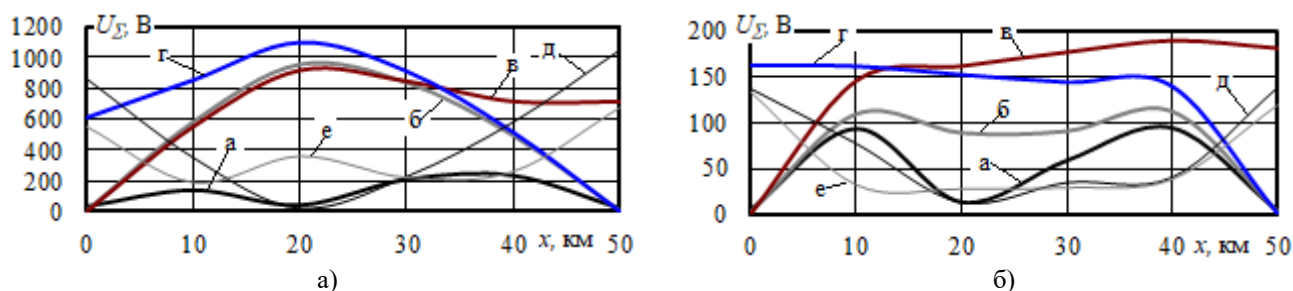


Рис. 14. Зависимости максимальных значений U_{Σ} от координаты x : а – ТС 25 кВ; б – ТС 2x25 кВ

Для сравнительного анализа электромагнитных влияний СТЭ различных конструкций разработаны специальные компьютерные модели, отвечающие консольному питанию тяговых сетей. При одинаковых нагрузках, приложенных в концах консолей, эти модели обеспечивают корректное сравнение наведенных напряжений. Рассматривались консольные ТС 25, 2x25, 94, 50, 2x50 и 50+110 кВ протяженностью 50 км с двумя контактными подвесками, разбитые на 5 участков по 10 км. В конце консолей КС каждого пути были приложены нагрузки $4 + j4$ МВ·А. Наведенные напряжения фиксировались на проводе, подвешенном на высоте 8 м. Ширина сближения принималась равной 50 м. Варьировались способы заземления провода, подверженного влиянию, в соответствии с рис. 3. Сопротивления растеканию заземлителей принимались равными 1 Ом. Результаты проиллюстрированы на рис. 15.

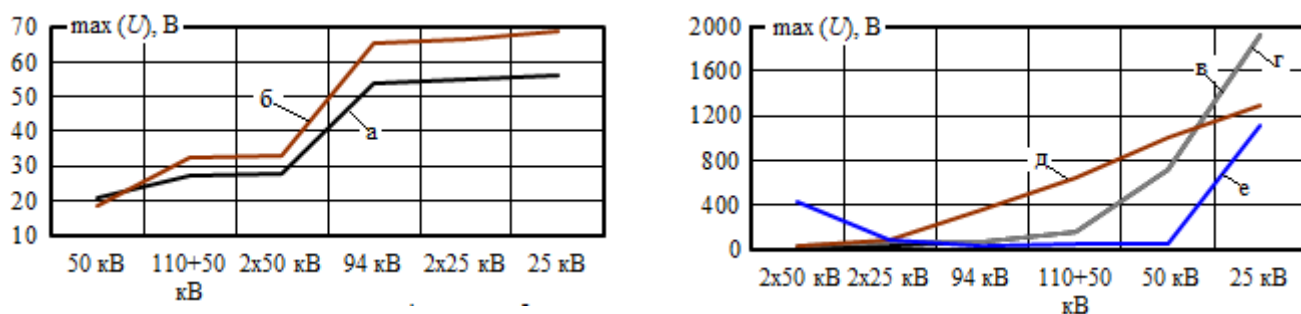


Рис. 15. Максимумы наведенных напряжений по участка ТС: буквами обозначены способы заземления в соответствии с рис. 3

Представленные результаты позволили сделать следующие выводы: при заземлениях по схемам, приведенным на рис. 3 а, б, максимумы наведенных напряжений для всех рассмотренных ТС лежат в диапазоне 18...69 В; наименьший уровень $\max(U)$ имеет место для ТС 50 кВ, что связано с более низкими токами, протекающими по проводам этой ТС; наибольшей величиной $\max(U)$ отличается наиболее распространенная ТС 25 кВ; при заземлениях по схемам, приведенным на рис. 3 в, г, д, е, максимумы наведенных напряжений для всех рассмотренных ТС лежат в диапазоне 23...1920 В; наименьший уровень $\max(U)$ имеет место для ТС 2x50 кВ; наибольшей величиной $\max(U)$ отличается наиболее распространенная ТС 25 кВ; при заземлении по схеме, представленной на рис. 3 д, потенциал в месте работ не превышает 0,1 В для всех рассмотренных ТС.

Наведенные напряжения зависят от траектории сближения, которые могут быть параллельными, непараллельными или иметь более сложную конфигурацию. Результаты моделирования при параллельной и сложной траектории сближения показаны на рис. 16.

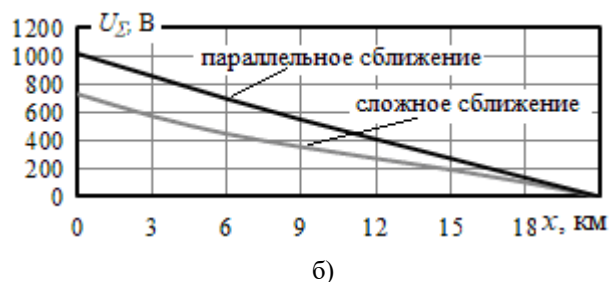
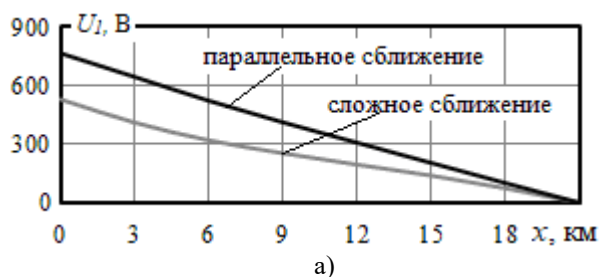


Рис. 16. Зависимости максимальных значений от координаты x

а – напряжение основной частоты; б – эффективное значение несинусоидального напряжения

Параллельная траектория отвечала ширине сближения 30 м, а сложная – соответствовала рис. 17. Результаты моделирования приводят к следующим выводам: зависи-

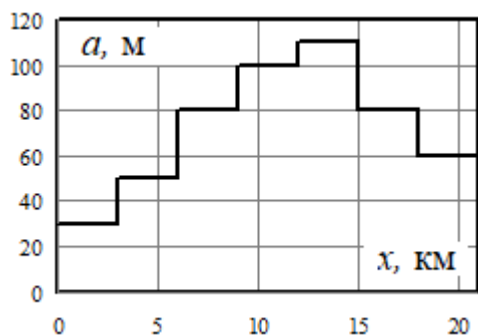


Рис. 17. Сложная траектория

мость наведенного напряжения от расстояния до точки заземления при параллельном сближении практически линейная ввиду принятого варианта профиля тягового тока; несинусоидальность наведенного напряжения мало зависит от расстояния до точки заземления смежного провода; предложенный подход позволяет учесть реальные траектории сближения железной дороги и смежных линий при любом конструктивном исполнении тяговой сети переменного тока.

В четвертой главе представлены результаты моделирования, направленного на определение технической эффективности мероприятий по снижению наведенных напряжений. Рассматривалось применение следующих устройств: отсасывающих трансформаторов; коаксиальных усиливающих кабелей; экранирующих проводов.

Для снижения напряжения магнитного влияния применяют отсасывающие трансформаторы (ОТ), увеличивающие взаимосвязь между контактной сетью и рельсами; при этом тяговый ток вместо возврата через землю протекает по рельсам или по специальному обратному проводу. Уменьшение расстояния между контактной сетью и цепью обратного тока приводит к снижению магнитного поля тяговой сети и уменьшению наводимых напряжений на смежные линии. На практике применяются два варианта включения ОТ: в первом варианте трансформаторы включаются в рассечку рельсов (ОТ РР) (рис. 18 а), во втором – используется обратный провод (ОТ ОП) (рис. 18 б).

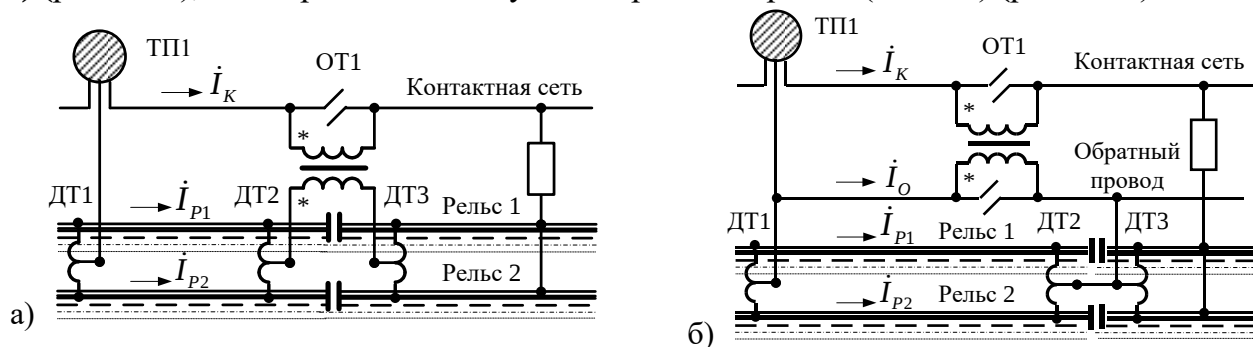


Рис. 18. Схемы включения ОТ на однопутном участке: а – ОТ РР; б – ОТ ОП;

ДТ1...ДТ3 – дроссель-трансформаторы

Для детального изучения защитного действия отсасывающих трансформаторов рассмотрена достаточно типичная межподстанционная зона двухпутного участка желез-

ной дороги переменного тока 25 кВ длиной 45 км. Результаты моделирования при ширине сближения 25 м проиллюстрированы на рис. 19.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: эффективность применения отсасывающих трансформаторов, включенных в рассечку рельсов мала ввиду утечки тока с рельсов в землю. Отсасывающие трансформаторы с обратным проводом этого недостатка не имеют.

Тяговая сеть переменного тока характеризуется значительной индуктивностью ТС, что приводит к значительным потерям напряжения. Индуктивное сопротивление тяговой сети и потери напряжения можно снизить на основе использования в качестве усиливающего провода коаксиального кабеля по схеме, приведенной на рис. 20.

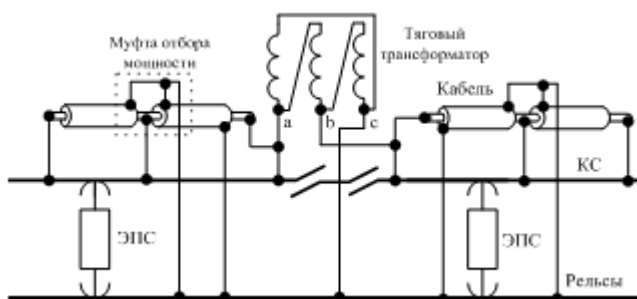


Рис. 20. ТС с коаксиальным кабелем

результаты: снижение электромагнитного влияния на смежные линии (рис. 21); стабилизация напряжения тяговой сети.

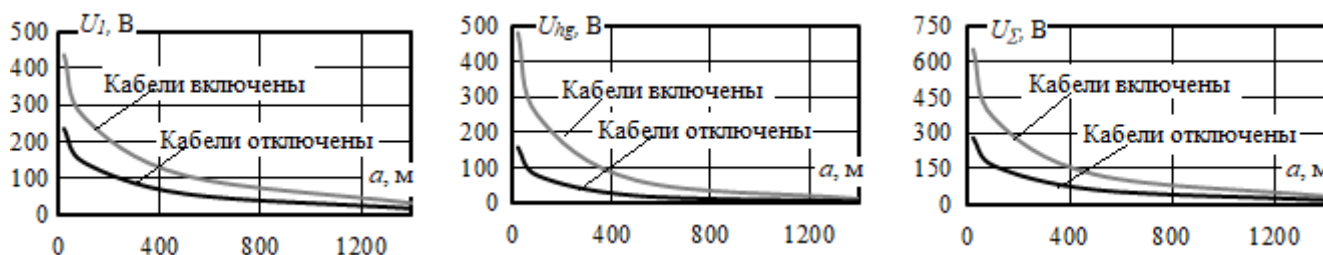


Рис. 21. Зависимости максимумов наведенных напряжений от ширины сближения

Совместное применение ОТ и кабелей повышает напряжение на токоприемниках, причем вариант с параллельным подключением жилы кабеля к контактной сети оказывается более эффективным. Наведенное напряжение на смежной отключенной и заземленной на удаленном конце линии уменьшается в 3...4 раза по сравнению с вариантом без отсасывающих трансформаторов.

В тяговых сетях переменного тока применяются экранирующие и усиливающие провода (ЭУП). Усиливающий провод и соединяется с контактной сетью, экранирующий – с рельсами. За счет ЭУП возможно получить следующие положительные результаты: стабилизацию напряжений на токоприемниках; снижение потерь электроэнергии в тяговой сети; уменьшение электромагнитного влияния ТС на смежные линии. Для до-

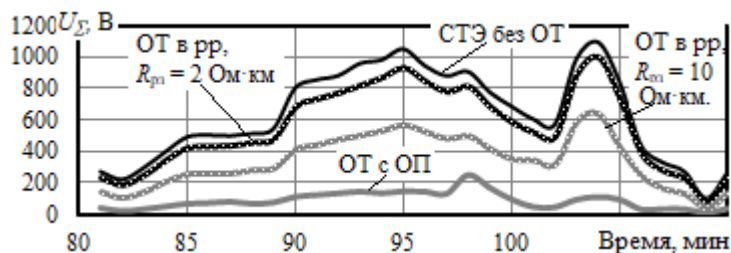


Рис. 19. Зависимость эффективного значения наведенного напряжения от времени

Цель моделирования состояла в определении эффективности коаксиального кабеля для снижения наведенных напряжений. Моделирование осуществлялось в двух вариантах: ТС с кабельной линией; ТС без нее. Результаты моделирования представлены на рис. 21. Анализ полученных результатов показал следующее: применение одножильного экранированного кабеля вместо обратного провода позволяет получить следующие положительные

полнительного снижения электромагнитных влияний ТС могут использоваться расщепленные экранирующие и усиливающие провода (РЭУП). Эффект применения ЭУП проиллюстрирован на рис. 22, 23.

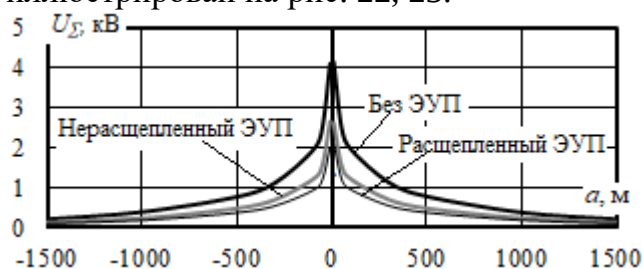


Рис. 22. Эффективное значение наведенного напряжения

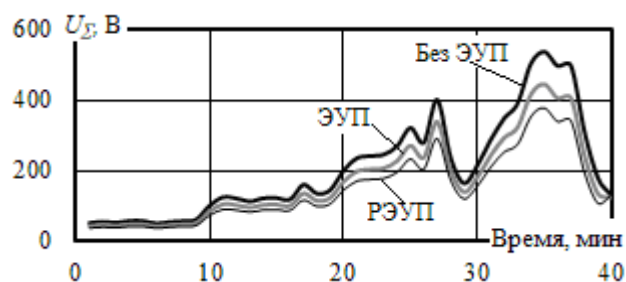


Рис. 23. Зависимость наведенного напряжения от времени при ширине сближения 50 метров

Таким образом, применение усиливающих и экранирующих проводов позволяет существенно снизить максимальные уровни наведенных напряжений; в схеме с ЭУП типовой конструкции на 60 %, а в схеме с расщепленными ЭУП в два раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных диссертационных исследований получены новые научные результаты, направленные на развитие и уточнение методов моделирования режимов ЭЭС, позволяющих определять электромагнитные влияния ЛЭП на смежные линии, адекватно работающие в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона, а также корректно учитывающие все значимые факторы, влияющие на уровни наведенных напряжений.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Получены новые результаты по развитию и уточнению методик определения наведенных напряжений на смежные ЛЭП, обеспечивающих приемлемую точность расчетов для ближней, промежуточной и дальней зон интеграла Карсона; разработанные методики применимы в нормальных и аварийных режимах влияющих ЛЭП, а также в режимах плавки гололеда на проводах ВЛ.

2. Разработаны оригинальные компьютерные модели для расчета наведенных напряжений, создаваемых высоковольтными кабелями с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена, компактными ЛЭП повышенной пропускной способности и многоамперными токопроводами.

3. Предложена методика определения наведенных напряжений в процессе имитационного моделирования режимов тяговых сетей (включая перспективные ТС повышенного напряжения), отличающаяся от известных возможностью использования при параллельных, сходящихся и сложных траекториях сближения.

4. Разработана оригинальная методика учета неоднородности электрических параметров грунтов на трассах сближения при определении наведенных напряжений.

5. На основе компьютерного моделирования по разработанным автором моделям впервые получены количественные данные, характеризующие техническую эффективность методов уменьшения наведенных напряжений.

6. Цифровые модели и результаты моделирования электромагнитных влияний, а также практические рекомендации по применению предложенных алгоритмов использованы в научно-исследовательской и проектной деятельности ООО «Транс-Атом» при решении задач по анализу режимов систем электроснабжения и выработке рекомендаций по повышению электробезопасности.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедрах «Электроэнергетика транспорта» ИрГУПС и «Электроснабжение и электротехника» ИРНИТУ, «Электротехника и электроника» Военно-промышленного колледжа провинции Фу Тхо Социалистической Республики Вьетнам.

7. Перспектива дальнейшей разработки темы может состоять в проведении исследований, направленных на получение 3D – моделей для определения взаимных электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

– в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.14.02:

1. Моделирование электромагнитных полей в системах тягового электроснабжения с коаксиальными кабелями / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Ты Нгуен. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т 21. № 12. С. 138-148.

2. Закарюкин В. П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Определение наведенных напряжений, создаваемых трехфазными линиями электропередачи в особых режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 911–923.

– в изданиях, рекомендованных ВАК по смежным специальностям:

1. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Ты Нгуен. Определение наведенных напряжений при сложных траекториях сближения тяговой сети переменного тока и смежной линии // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. № 2(62). 2016. С. 115-123.

2. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных устройствами для уменьшения электромагнитных влияний на смежные линии электропередачи // Транспорт: наука, техника, управление. № 9. 2016. С. 12-18.

3. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты. Моделирование систем тягового электроснабжения с коаксиальными кабелями и отсасывающими трансформаторами // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 4. С. 17-22.

4. Электромагнитная безопасность в тяговых сетях с расщепленными экранирующими и усиливающими проводами / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Нгуен Ты // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. № 4(68). 2017. С. 142-152.

– в изданиях, проиндексированных в Scopus

1. Natal'ya Buyakova, Vasiliy Zakaryukin, Andrey Kryukov, Tu Nguyen. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems // E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES 2018, pp. 1 – 6. doi.org/10.1051/e3sconf/20185803003.

2. Natal'ya Buyakova, , Andrey Kryukov, Tu Nguyen, Simulation of Induced Voltages Created by High Tension Cable with Cross-Linked Polyethylene Insulation //Proceedings – 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. pp. 488-492. doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.

– в других изданиях:

1. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты. Электромагнитная безопасность в тяговых сетях, усиленных коаксиальными кабелями // Электробезопасность. № 1. 2016. С. 22-31.

2. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты. Электромагнитное влияние тяговых сетей с экранирующими и усиливающими проводами // Электробезопасность. № 2. 2016. С. 22-30.

3. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ты Нгуен. Электромагнитная обстановка в системах тягового электроснабжения, усиленных коаксиальными кабелями // Оперативное управление в электроэнергетике. № 5. 2016. С. 10-19.

4. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Моделирование электромагнитного влияния системы тягового электроснабжения с коаксиальным кабелем // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. № 1(6). 2016. С. 28-34.

5. Буякова Н. В., Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты. Повышение электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железных дорог// Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 69. Надежность развивающихся систем энергетики. Кн. 2. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018. С. 257–266.

6. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты. Моделирование электромагнитных влияний тяговой сети с коаксиальным кабелем // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. В 2-х тт. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2016. С. 578-583.
7. Ты Нгуен. Моделирование электромагнитных влияний тяговой сети на смежные линии электропередачи // Молодая мысль – развитию энергетики. Братск: БрГУ, 2016. С. 314-318.
8. Нгуен Ты, Соболевский П.С. Влияние отсасывающих трансформаторов на уровень наведенных напряжений в линии «два провода - рельс»// Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск: ИрГТУ, 2017. Т. 2. С.258-262.
9. Нгуен Ты. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оборудованных отсасывающими трансформаторами// Транспортная инфраструктура Сибирского региона. В 2-х тт. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2017. С. 731-736.
10. Электромагнитная безопасность в системах тягового электроснабжения, оборудованных отсасывающими трансформаторами / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Ты Нгуен. // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – Севастополь: СевГУ, 2017. С. 227-233.
11. Нгуен Ты. Системы тягового электроснабжения с пониженным электромагнитным влиянием на смежные линии электропередачи // Энергетика в современном мире. Чита, ЗабГУ, 2017. С. 13-19.
12. Нгуен Ты. Электромагнитные влияния тяговых сетей с расщепленными экранирующими и усиливающими проводами // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. В 2-х тт. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2018. С. 659-664.
13. Нгуен Ты. Электромагнитное влияние тяговой сети на железнодорожных станциях// Молодая мысль – развитию энергетики. Братск: БрГУ, 2018. С. 127-131.
14. Крюков А. В., Нгуен Ты, Глызин Е. А. Электромагнитная обстановка в тяговых сетях с симметрирующими трансформаторами и коаксиальными кабелями // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск: ИрГТУ, 2018. С.151-156.
15. Крюков А. В., Лагунова Н. С., Нгуен Ты. Определение наведенных напряжений, создаваемых высоковольтными ЛЭП на смежных линиях в режимах плавки гололеда// Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск: ИрГТУ, 2019. Т. 2. С.182-186.
16. Нгуен Ты. Улучшение условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях железных дорог// Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения. Тольятти, 2019. С 291-296.
17. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Нгуен Ты. Определение наведенных напряжений, создаваемых трехфазной ЛЭП в режимах обрыва фаз // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи. В 2-х тт. Т. 1. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. С. 73-76.
18. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Ты Нгуен. Определение наведённых напряжений, создаваемых трехфазной ЛЭП 220 кВ в режимах несимметричных коротких замыканий// Наука и образование: актуальные исследования и разработки. Чита: ЗабГУ, 2019. С.139 – 144.
19. Крюков А. В., Нгуен Ты. Определение наведенных напряжений, создаваемых высоковольтным кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена// Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск: ИрГТУ, 2020. Том 1. С.163-167.
20. Буякова Н. В., Крюков А. В., Нгуен Ты. Моделирование наведенных напряжений, создаваемых высоковольтным кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена // Фундаментальные проблемы управления производственными процессами в условиях перехода к индустрии 4.0. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. С. 159-166.