

На правах рукописи



**Залесова Ольга Валерьевна**

**Теоретическое и экспериментальное исследования электромагнитной  
совместимости железных дорог переменного тока и высоковольтных сетей  
энергосистем в условиях грунтов с низкой проводимостью**

*Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений*

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Апатиты – 2017

Работа выполнена в Центре физико-технических проблем энергетики Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Кольского научного центра Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Ефимов Борис Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, директор Центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Кольского научного центра Российской академии наук

**Официальные оппоненты:** **Фоминич Эдуард Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, Военный институт (инженерно-технический) федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева», профессор кафедры электроснабжения, электрооборудования и автоматики

**Куценко Сергей Михайлович**  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации»

Защита состоится «22» июня 2018 г. в 14 часов в ауд. 118 на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «  »                      20   г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент



Попов М.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

---

### **Актуальность проблемы.**

В настоящее время большая часть электрифицированных железных дорог в России работает по системе переменного тока промышленной частоты. По сравнению с системой на постоянном токе она имеет ряд преимуществ, таких как увеличение расстояния между тяговыми подстанциями, уменьшение площади сечения проводов контактной сети, сокращение потерь электроэнергии и пр. Однако, существенным недостатком тяговых сетей переменного тока является создаваемое ими мощное электромагнитное поле, влияние которого особенно сильно проявляется в условиях грунтов с низкой проводимостью на смежные линии различного назначения железнодорожной энергетики, и в том числе на воздушные линии электропередачи высокого напряжения (ВЛ).

Нагрузка каждой тяговой подстанции является непрерывно меняющейся величиной, поэтому при измерении наведённого напряжения на ремонтируемых линиях, как того требуют “Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок” (ПОТЭУ), невозможно гарантировать протекание наибольшего рабочего тока в контактной сети в момент измерения. В связи с этим актуальным является расчетное определение значений наведенных напряжений на отключенных ВЛ.

Диссертационная работа выполнялась в рамках гранта Федерального государственного бюджетного учреждения «Российский фонд фундаментальных исследований», проект “Теоретическое и экспериментальное исследование наведенных напряжений и токов проводных воздушных и кабельных линий, находящихся в зоне влияния разветвленной высоковольтной сети” (№ 09-08-00276), а также ряда госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ (НИР) в том числе: “Теоретическое и экспериментальное исследование электромагнитной совместимости железных дорог переменного тока и высоковольтных сетей энергосистем” по теме “Исследование комплексных физико-технических проблем надежности эксплуатации и использования высоковольтного оборудования энергосистем с учетом процессов его старения и повышения требований к электромагнитной совместимости” (Госбюджетный договор на 2006 г. №2-02-3002); “Исследования наведенных напряжений на участках ВЛ, имеющих сближения с электрифицированной железной дорогой и разработка предложений по защите ремонтного персонала линий” (Договор с ОАО “МРСК Северо-Запада” “Колэнерго” от 14 апреля 2008 г. №3341).

**Цель работы.** Теоретическое и экспериментальное исследование электромагнитного влияния контактной сети железной дороги переменного тока на сети высокого напряжения и разработка рекомендаций по повышению безопасности ремонтных работ на отключенных ВЛ.

Для достижения поставленной цели в работе формулируются и решаются следующие задачи:

- экспериментальное исследование спектрального состава тока тяговой сети и распределение обратного тягового тока в рельсовой сети и грунте;
- построение схемы замещения влияющего участка железной дороги и создание математической модели распределения токов в тяговой сети;
- разработка алгоритма расчета наведенных напряжений на отключенных линиях электропередачи, вызванных электромагнитным влиянием железной дороги переменного тока;
- экспериментальное и расчетное исследования значений наведенного напряжения на отключенной ВЛ, подверженной влиянию контактной сети железной дороги переменного тока, сопоставление опытных и расчетных данных результатов исследований;
- моделирование влияния тяговой сети одно– и двухпутных участков железной дороги на смежные ВЛ;
- разработка рекомендаций по повышению защиты ремонтного персонала ВЛ от наведенных напряжений.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты экспериментальных исследований спектрального состава тока тяговой сети и распределения тока в рельсовых путях на однопутном участке железной дороги переменного тока.

2. Схема замещения влияющего участка железной дороги и методика расчета тока в тяговой сети в зависимости от количества нагрузок в зоне питания.

3. Алгоритм и программа расчета наведенного напряжения на отключенных ВЛ, подверженных электромагнитному влиянию контактной сети железной дороги переменного тока.

4. Результаты расчетов наведенного напряжения на отключенной ВЛ класса напряжения 110 кВ, расположенной вдоль действующего однопутного участка железной дороги, а также их сопоставление с экспериментальными данными.

5. Результаты теоретических исследований наведенных напряжений на примере высоковольтных линий класса напряжения 110-150 кВ Кольского полуострова, имеющих сближение с одно– и двухпутными участками железной дороги переменного тока.

6. Рекомендации по повышению безопасности ремонтных работ на ВЛ.

**Научная новизна.** В диссертационной работе решен комплекс вопросов, позволяющих оценить электромагнитное влияние тяговой сети железной дороги переменного тока на смежные отключенные ВЛ. К наиболее значимым следует отнести следующие результаты исследований: определены спектральные составы тока в тяговой сети при одном и нескольких электровозах на участке железной дороги и наведенного напряжения на смежной ВЛ, выявлена взаимосвязь между данными величинами; предложена расчетная программа, позволяющая получить оценку уровня наведенного напряжения на проводах отключенных ВЛ при различных способах ее заземления.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечиваются применением достаточно полных математических моделей исследуемых процессов, представительных по объему экспериментальных и теоретических исследований, а также удовлетворительной сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными.

#### **Практическое значение работы.**

1. Разработана программа, с помощью которой можно быстро и с достаточной точностью определить распределение наведенных напряжений на любой ВЛ, подверженной влиянию тяговой сети железной дороги, электрифицированной на переменном токе.

2. Исследовано влияние одно- и двухпутных участков Октябрьской железной дороги, работающих по системе тягового электроснабжения  $1 \times 25$  кВ, на расположенные вблизи отключенные линии электропередачи в рамках региональной энергосистемы, что позволило определить линии, на которых уровень наведенного напряжения превышает допустимый 25 В.

3. Разработаны рекомендации по повышению безопасности ремонтных работ на отключенных ВЛ.

**Методы исследований** базируются на законах теории электромагнитного поля, методах математического анализа. Методом исследования при выполнении теоретического исследования являлось математическое моделирование. Программа для расчета наведенного напряжения на ВЛ была написана на языке программирования Fortran. Исходными данными являлись действующие значения токов и напряжений тяговой сети.

**Реализация результатов работы.** На основе разработанных методов расчетов и результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований наведенных напряжений на воздушных линиях электропередачи Кольского полуострова была подготовлена к использованию программа для расчета наведенных напряжений на отключенных линиях. В рамках рассматриваемой энергосистемы были определены линии класса напряжения 110-150 кВ, на которых значения

наведенного напряжения превышают допустимый уровень, и разработаны рекомендации по обеспечению безопасности ремонтных работ на линиях.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на Национальном конгрессе по энергетике, Казань, 8-12 сентября 2014 г., на Международной научно-технической конференции “Электроэнергетика глазами молодежи”, Казань, 19 – 23 сентября 2016 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано лично и в соавторстве 17 печатных работ, в том числе 3 – в реферируемом журнале.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения, включает 118 страниц основного текста, 67 рисунков, 22 таблицы и список литературы из 31 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

---

Во введении дана краткая характеристика диссертационной работы и обоснована актуальность проблемы исследования наведенных напряжений на линиях электропередачи высокого напряжения, вызванных тяговой сетью железной дороги переменного тока, в районе с низкой проводимостью грунта. Определены цели и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 приведен анализ современного состояния проблемы и предварительная оценка величин наведенного напряжения на ремонтируемой ВЛ, подверженной влиянию тяговой сети железной дороги переменного тока. Рассмотрены рекомендации и требования нормативных документов, относящихся к обеспечению безопасного проведения ремонтных работ на отключенных линиях электропередачи. Определены направления исследований в соответствии с поставленной целью диссертационной работы.

Уровень наведенного напряжения на проводах отключенных линий электропередачи, подверженных влиянию железной дороги, зависит главным образом от тока, протекающего в тяговой сети, геометрических параметров сближения линии с влияющим участком железной дороги, удельной проводимости грунта, а также от таких факторов как: тип состава, режим работы электровоза, количество составов на одной межподстанционной зоне и их взаимного расположения.

Железная дорога переменного тока является полностью несимметричной цепью, в качестве обратного провода которой используют рельсы. Часть тягового тока из рельсов ответвляется и протекает на тяговую подстанцию через землю. Это обстоятельство ведет к увеличению напряжения, наводимого на расположенных вблизи ВЛ и других протяженных коммуникациях, поскольку электромагнитная

составляющая наведенного напряжения напрямую зависит от величины тока, стекающего в землю, особенно в условиях высокоомных грунтов.

Таким образом, важное значение для безопасного проведения ремонтных работ на отключенных линиях электропередачи приобретает расчетное определение возможных величин наведенных напряжений во всех местах проведения ремонтов с учетом максимальных нагрузок в контактной сети и распределения обратного тягового тока между рельсами и землей.

Со стороны железнодорожной энергетики проблеме опасного и мешающего влияния контактной сети переменного тока уделяется особое внимание. Обзор известных публикаций показал, что некоторые исследователи (Закарюкин В.П., Крюков А.В., Карякин Р.Н., Косарев А.Б., Лукьянов П.Ю. и др.) фактически затрагивают проблему электромагнитного взаимодействия электрифицированной железной дороги и ВЛ высокого напряжения. Однако вопросы, связанные с безопасностью работы персонала энергосетевых предприятий в них не рассматриваются.

Во второй главе описан метод регистрации токов в рельсовых путях на однопутном участке железной дороги; определены экспериментальные значения тяговых токов, потребляемых электроподвижными составами; выполнен анализ спектрального состава измеренных токов в рельсах, рассмотрено доленое распределение обратного тягового тока между рельсами и землей.

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется выпрямительными установками на электровозе, что приводит к появлению гармоник высоких частот в тяговой сети. Для исследования спектрального состава обратных тяговых токов проводились их экспериментальные измерения в рельсовых путях.

Для чистоты эксперимента было выбрано сближение ВЛ класса напряжения 110 кВ с однопутным участком железной дороги переменного тока. Мониторинг токов в рельсах проводился в различных местах этого участка в районе станций Хибинь и Имандра (рисунок 1). Из базы данных токов, зарегистрированных в рельсах, были выбраны случаи, когда на однопутном участке железной дороги в рабочем режиме находились один или два электроподвижных состава (ЭПС).

Анализ результатов экспериментальных исследований тягового тока показал, что основной вклад в его состав вносит, естественно, первая гармоника (приблизительно 95% от полного тока). Однако, токи первых трех высших гармоник имеют достаточно большие значения (рисунок 2).

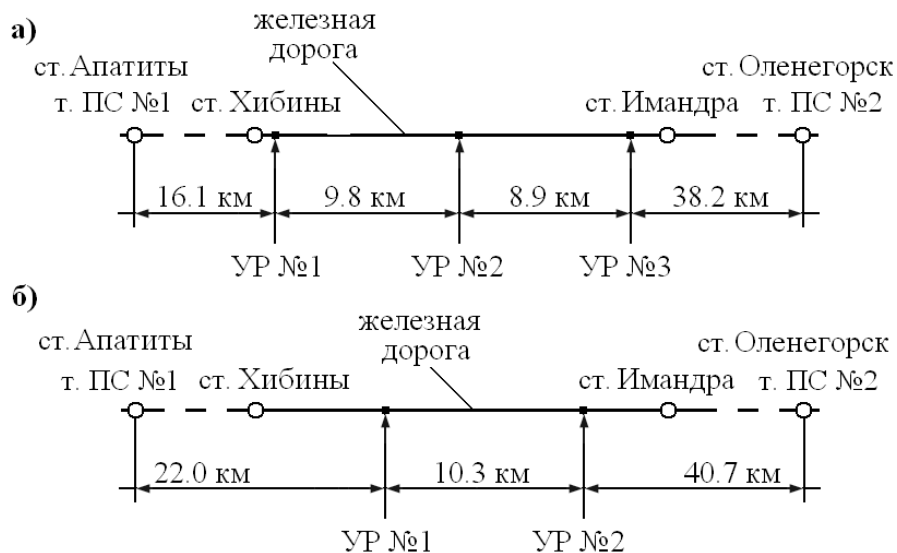


Рисунок 1 – Схемы регистрации обратного тягового тока в рельсовой цепи а) в 2008 г. и б) в 2011 г.

Сравнение спектров тока тяговой сети при одном и двух ЭПС на участке показало, что в пятидесяти процентах случаев амплитудные значения высших гармоник тока в тяговой сети, питающей два ЭПС, оказались ниже в 1.1-1.5 раза соответствующих значений гармоник при одном ЭПС. В других случаях они либо были равны, либо наоборот превышали значения при одном ЭПС в 1.1-1.25 раза.

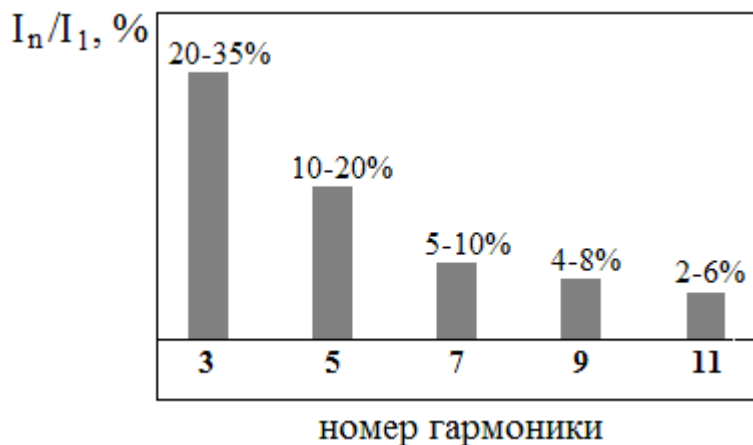


Рисунок 2 – Гармонический состав обратного тягового тока

Синхронизированные измерения токов в нескольких точках регистрации исследуемого участка железной дороги позволили оценить долю токов, протекающих в рельсовых путях. Она составила порядка 40 – 50 процентов от тока в контактной сети. Исследования также показали, что ток в условиях низко проводящего грунта активно стекает в землю на протяжении первых 10 км.

В третьей главе описан метод и представлены результаты измерений значений наведенного напряжения на проводах отключенной линии электропередачи,



вызванных работой тяговой сети железной дороги; проведен анализ экспериментальных значений наведенных напряжений.

Синхронно с измерениями токов в рельсах выполнялись измерения наведенных напряжений на фазных проводах отключенной высоковольтной линии относительно контура заземления ОРУ подстанции 110 кВ на спусках от линейного разъединителя линии. На противоположном конце линия была заземлена на ОРУ подстанции.

В результате экспериментальных исследований были определены величины наведенных напряжений на отключенной ВЛ при прохождении по участку одного и двух электроподвижных составов. Сравнение опытных данных в первом случае показало, что между наведенным напряжением и тяговым током во влияющей сети есть положительная корреляция (коэффициент корреляции составил 0.99).

На рисунке 3 представлены фрагменты осциллограмм тока в рельсовой сети и наведенного напряжения на отключенной ВЛ, где можно видеть, что ток, а вместе с ним и наведенное напряжение, имеют одинаковый период – две сотых секунды, который соответствует частоте тока питающей сети, но форма кривых значительно отличается от синусоиды, что говорит о наличии высших гармоник в спектре тока рельсовой сети и, как следствие, в спектре наведенного напряжения на линии.

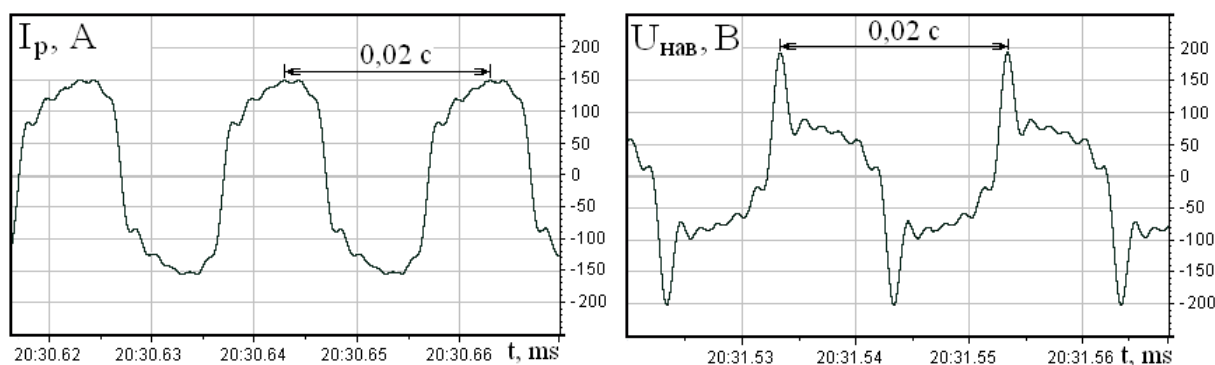


Рисунок 3 – Осциллограммы тока в рельсовой сети и наведенного напряжения на отключенной ВЛ

В четвертой главе описывается математическая модель тяговой сети железной дороги, приводится метод расчета наведенных напряжений на отключенных линиях электропередачи, проводятся многовариантные расчетные исследования возможных значений наведенных напряжений на отключенных линиях электропередачи, выполняется сравнение опытных и расчетных данных.

При построении математической модели контактной сети со схемой двухстороннего питания расчет электроснабжения участка основывался на решении мгновенных схем, построенных для отдельных моментов времени. На двухпутных участках в качестве схемы соединения контактных сетей принималась узловая схема питания.

Распределение тока в тяговой сети задавалось в программе расчета наведенного напряжения следующим образом. Вся межподстанционная зона между тяговыми подстанциями №1 и №2 делится на участки в зависимости от количества электроподвижных составов, находящихся на ней (рисунок 4).

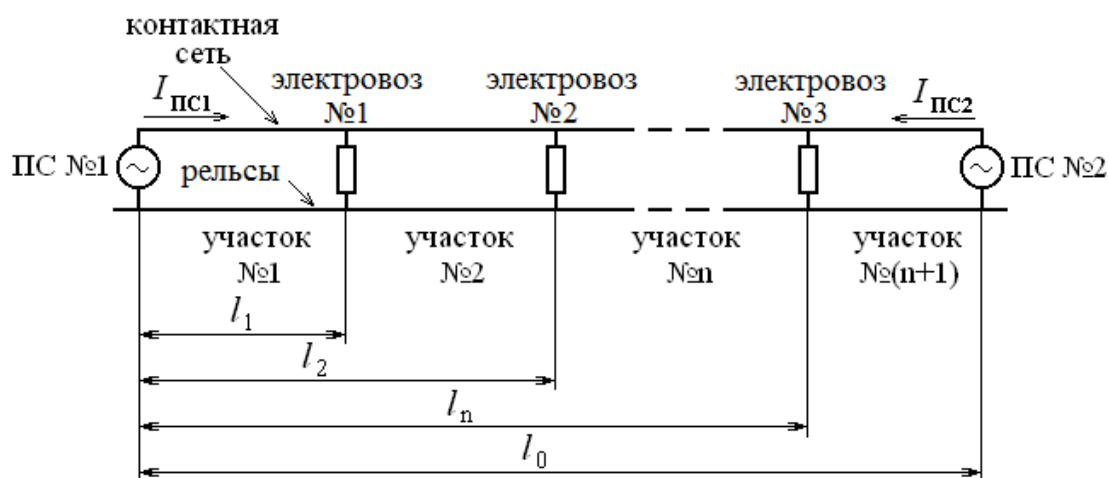


Рисунок 4 – Схема распределения тока в тяговой сети

На первом и последнем участках токи в контактной сети рассчитываются как токи фидеров питающих тяговых подстанций с учетом знаков по следующим формулам:

$$I_{1к} = \sum_{i=1}^n I_{эл i} \cdot \frac{l_0 - l_i}{l_0} \text{ и } I_{(n+1)к} = -\sum_{i=1}^n I_{эл i} \cdot \frac{l_i}{l_0},$$

где  $i$  – номер участка, соответствующий номеру ЭПС, который находится в конце данного участка;  $I_{эл}$  – полный ток, потребляемый электропоездом;  $l_0$  – длина межподстанционной зоны;  $l_i$  – длина  $i$ -го участка;  $n$  – количество ЭПС.

Распределение токов в контактной сети на промежуточных участках определяется с помощью метода суперпозиции по формуле:

$$I_{кji} = -\sum_{i=2}^{j-1} I_{эл i} \cdot \frac{l_i}{l_0} + \sum_{i=j}^n I_{эл i} \cdot \frac{l_0 - l_i}{l_0},$$

где  $j$  – участок, для которого проводится расчет тягового тока.

Ток в рельсовой сети, определяется выражением:  $I_p = (1 - k_{зд}) I_k$ , где  $I_k$  – ток в контактной сети. В настоящей работе коэффициент защитного действия рельса  $k_{зд}$ , с учетом удельного сопротивления грунта и количества путей на участке железной дороги, был принят равным для однопутного участка – 0.55, двухпутного – 0.45.

В случае, когда на участке находится один ЭПС, наведенные напряжения на отключенной линии электропередачи определяются четырьмя контурами переменной длины (рисунок 5).

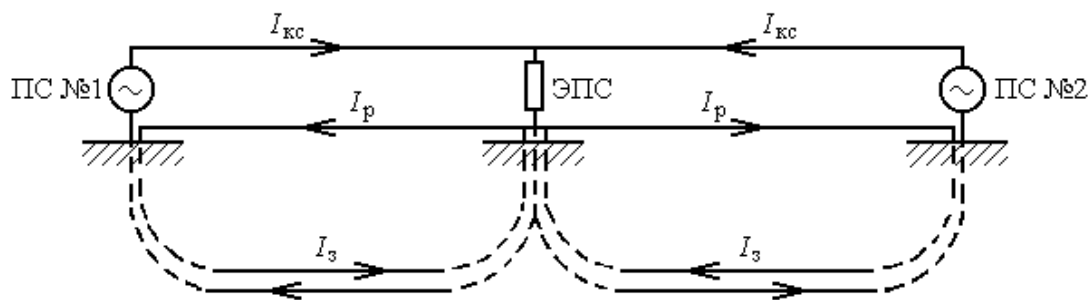


Рисунок 5 – Схема замещения влияющего участка железной дороги

В программе расчета наведенного напряжения определение э.д.с. взаимной индукции на единицу длины провода ВЛ, подверженной влиянию, на каждом участке сближения рассчитывается как алгебраическая сумма э.д.с., созданных контурами контактный провод – земля и рельсы – земля

$$E_{ki} = \sum_{k=1}^2 Z_{ki} \cdot I_k \cdot k_{з\partial},$$

где  $k$  – влияющий провод,  $i$  – провод отключенной линии,  $I_k$  – ток во влияющем проводе,  $Z_{кв}$  – продольное взаимное сопротивление между проводами  $k$  и  $i$ ,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $k_{з\partial}$  – коэффициент защитного действия рельса.

Комплексное продольное сопротивление между проводами тяговой сети и ремонтируемой ВЛ имеет вид

$$Z_{ki} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{2e^{-\lambda(h_k+h_i)} \cos(\lambda b_{ki})}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega\mu_0}{\rho_3}}} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ki}}{d_{ki}},$$

где  $d_{ki}$  – кратчайшее расстояние между проводами  $k$  и  $i$ ,  $D_{ki}$  – расстояние между  $i$ -м проводом и отражением  $k$ -го провода относительно поверхности земли. Для их определения применяются следующие формулы:

$$D_{ki} = \sqrt{b_{ki}^2 + (h_i + h_k)^2}; \quad d_{ki} = \sqrt{b_{ki}^2 + (h_k - h_i)^2},$$

где  $b_{ki}$  – расстояние по горизонтали между проводами  $k$  и  $i$ ,  $h_{ki}$  – высота провода над землей. Удельное сопротивление грунта  $\rho_3$  в расчетах принималось равным 1000 Ом·м.

Электрическая составляющая наведенного напряжения в расчетах определяется соотношением собственных и взаимных частичных емкостей между всеми проводниками системы. В связи с тем, что на железной дороге применяется относительно низкое питающее напряжение (27.5 кВ) и взаимная емкость быстро уменьшается с увеличением ширины сближения, электрическая составляющая вносит значительно меньший вклад в наведенное напряжение.

Для сравнения расчетных результатов с опытными данными наведенного напряжения в программе была воспроизведена расчетная модель исследуемых

объектов, соответствующая реальной модели сближения. Результаты расчетов представлены на рисунке 6.

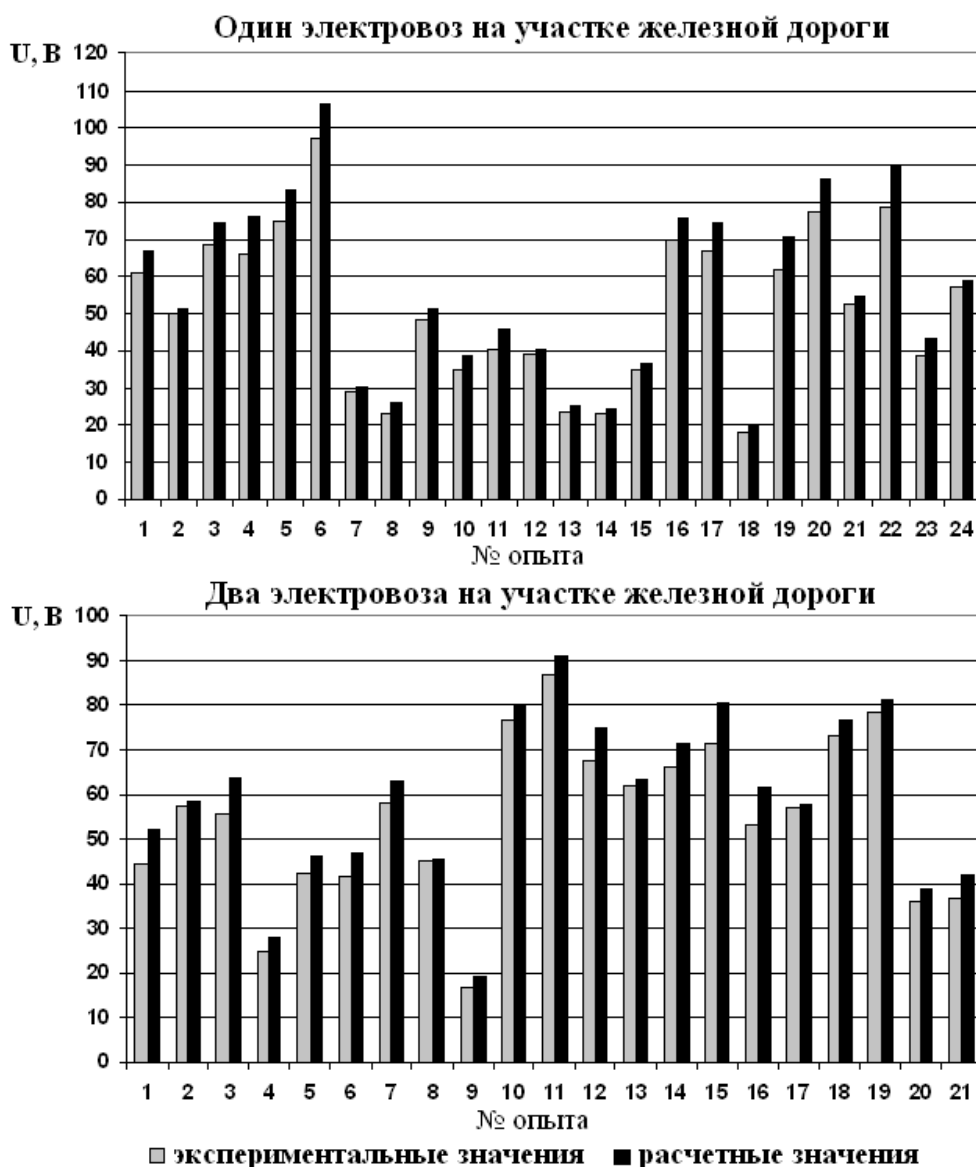


Рисунок 6 – Гистограмма экспериментальных и расчетных значений наведенных напряжений на проводе отключенной ВЛ

Анализ результатов расчетов показал, что значения наведенных напряжений отличаются от измеренных величин на отключенной линии для двух рассматриваемых случаев в среднем на 9 процентов (всегда в большую сторону). В наихудшем случае отличие расчетных значений составило 17 процентов.

Исследование наведенных напряжений на отключенных линиях с помощью разработанной программы выполнялось на моделях с различными конфигурациями сближения тяговой сети одно- и двухпутных участков железной дороги и смежной ВЛ при умеренном токе в контактной сети. По результатам исследования были определены зависимости уровня наведенного напряжения от следующих параметров

1 – ширины сближения  $b$ , 2 – длины сближения  $l$  и 3 – удельного сопротивления грунта  $\rho$  (рисунок 7).

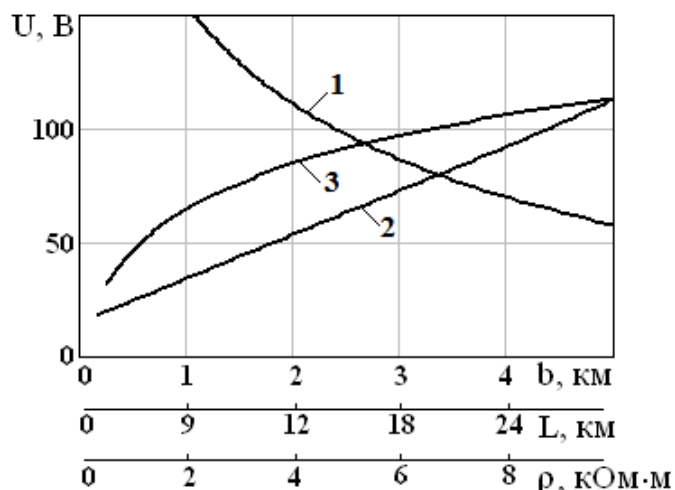


Рисунок 7 – Зависимость уровня наведенного напряжения на отключенной ВЛ от 1) ширины сближения  $b$ , 2) длины сближения  $l$ , 3) удельного сопротивления грунта  $\rho_{гр}$ . Параметры модели:  $l_{жд}=30$  км,  $l_{вл}=30$  км,  $I_{кп}=300$  А,  $b=2$  км,  $\rho=1000$  Ом·км,  $k_{зд}=0.55$

Наведенное напряжение на проводах ВЛ, при параллельном сближении с тяговой сетью железной дороги, в каждый момент времени имеет максимум в точке линии, находящейся напротив электровоза (при одном составе на участке) или одного из электровозов (при двух составах на участке). Кроме того, наихудшим моментом при равномерном прохождении одиночного состава вдоль отключенной линии является момент, когда электровоз находится напротив середины линии (рисунок 8 а), в это время наведенное напряжение на середине линии достигает абсолютного максимума. В случае двух ЭПС на участке место на линии, где будет наблюдаться максимум наведенного напряжения, смещается относительно центра участка сближения на расстояние, равное половине расстояния между электровозами, в сторону большей нагрузки (рисунок 8 б). В расчетах принималось минимально допустимое расстояние между составами при движении их в одном направлении ( $L = 7$  км).

С целью сравнения разработанной программы с другими доступными средствами, применимых для моделирования электромагнитного воздействия тяговой сети железной дороги переменного тока на отключенные воздушные линии электропередачи, были проведены расчетные исследования наведенного напряжения для модели сближения ВЛ и однопутного участка железной дороги, соответствующей реальному сближению объектов, для которых выполнялись экспериментальные исследования, с помощью программного комплекса АТР-ЕМТР.

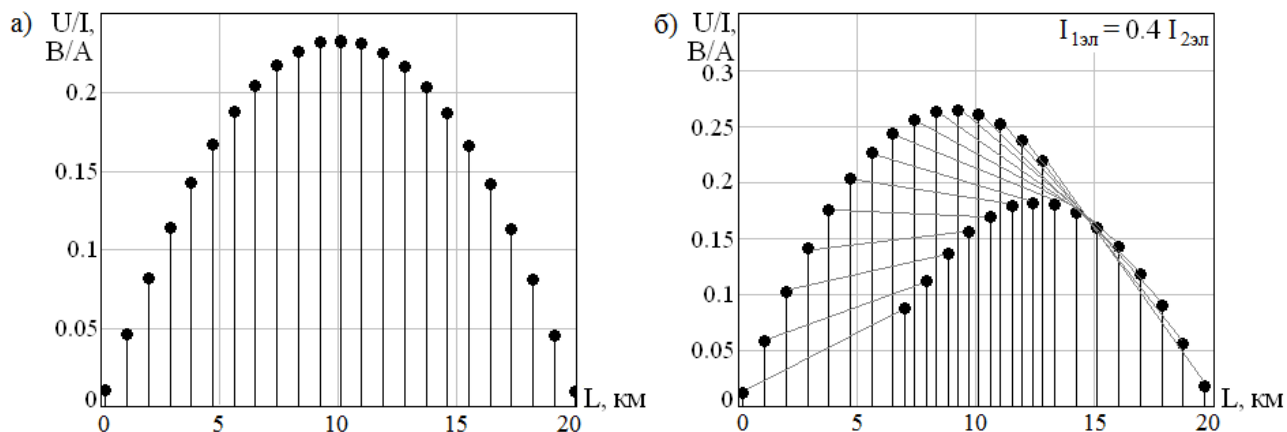


Рисунок 8 – Величины наведенного напряжения на отключенной и заземленной по концам ВЛ на 1А влияющего тока в контактной сети при прохождении по участку а) одного ЭПС, б) двух ЭПС

Исследования, проведенные с помощью данной программы, показали, что отличие расчетных значений наведенных напряжений от экспериментальных данных несильно различается с соответствующими результатами, полученными с помощью разработанной программы (отличие по разработанной программе оказалось больше приблизительно на 3-5 процентов). Это также говорит о возможности использования последней наравне с другими программами расчета. Однако, в отличие от той же программы АТР-ЕМТР, разработанная программа имеет преимущество, такое как упрощенная форма задания исходных данных для модели сближения ВЛ с влияющим участком железной дороги.

В пятой главе приводится краткая характеристика линий энергосистемы, подверженных электромагнитному влиянию тяговой сети железной дороги переменного тока; представлены результаты расчета наведенного напряжения для данных линий; даются рекомендации по повышению безопасности ремонтных работ для линий энергосистемы.

В перечень линий электропередач рассматриваемой энергосистемы, подверженных влиянию тяговой сети железной дороги переменного тока, вошли 22 линии класса напряжения 110-150 кВ: из них 8 расположены вдоль однопутных участков и 14 – вдоль двухпутных участков.

Расчеты наведенного напряжения на всех отобранных ВЛ проводились для умеренного тока в контактной сети однопутного участка –  $I_{кс} = 600$  А, двухпутного участка –  $I_{кс} = 1000$  А (рисунок 9). При этом расположение места ремонта на отключенной ВЛ и нахождение ЭПС на межподстанционной зоне совпадало с серединой участка сближения.

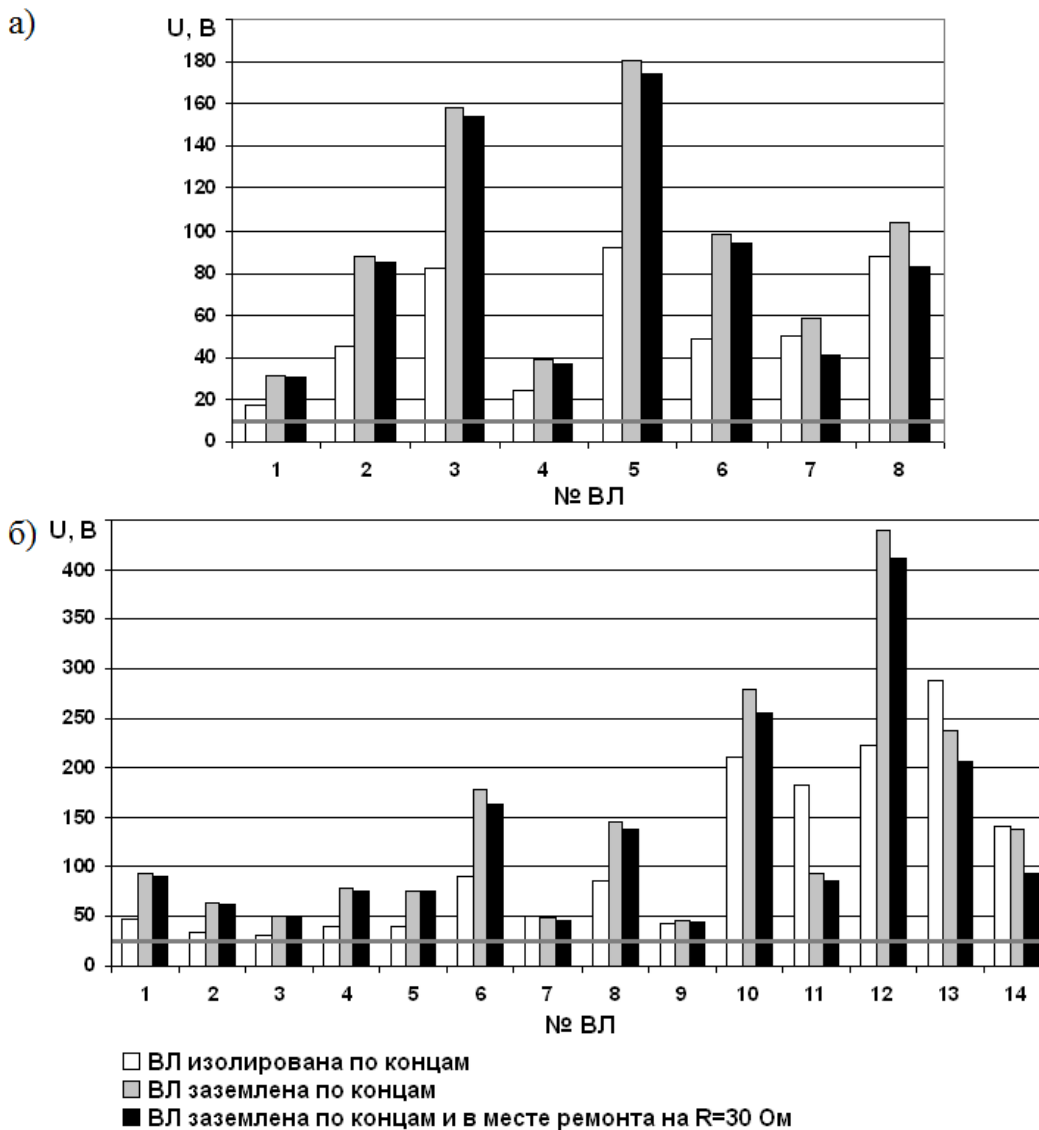


Рисунок 9 – Гистограмма значений наведенного напряжения на отключенных ВЛ, вызванных электромагнитным влиянием контактной сети а) однопутного участка железной дороги, б) двухпутного участка железной дороги

Результаты расчетов показали, что уже в случае одной нагрузки в зоне питания уровень наведенного напряжения на проводах всех отключенных линий при заземлении их по концам на контуры заземления подстанций значительно превышает допустимое значение (25 В). При дополнительном заземлении линий в месте ремонта на сопротивление 30 Ом положение не улучшается: значение наведенного напряжения по-прежнему превышает допустимый уровень.

Наиболее эффективным способом защиты ремонтного персонала от наведенного напряжения, вызванного только влиянием тяговой сети железной дороги, по результатам расчетного исследования является заземление отключенной линии в одной точке – месте ремонта непосредственно на опору или на двух смежных опорах. Это не создаст дополнительных длинных контуров, в которых может быть наведена опасная э.д.с., и облегчает требования к допустимому сопротивлению опор в месте

ремонта. Результаты расчетного исследования, выполненные по данной схеме заземления ремонтируемой линии, показали, что на всех исследуемых линиях энергосистемы уровень наведенного напряжения в месте ремонта не превысил 2 В.

Однако большинство из исследуемых линий (82 %) подвержены не только электромагнитному влиянию контактной сети железной дороги переменного тока, но и влиянию проходящих рядом с ними действующих линий электропередачи.

Для таких линий рекомендуется предварительно провести расчет суммарного воздействия близлежащих ВЛ и контактной сети железной дороги, по результатам которого выбрать схему заземления линии, обеспечивающей безопасность проведения ремонтных работ. В том случае, когда схема заземления только в месте ремонта не работает, рекомендуется проводить работы на линии под наведенным напряжением с использованием защитных средств.

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. В диссертации выполнено экспериментальное исследование токов в тяговой сети и рассмотрен их спектральный состав. В результате было определено, что существенный вклад в наведенное напряжение на смежных ВЛ вносят третья и пятая гармоники тяговых токов, величины которых составляют порядка 20 – 35 процентов и 10 – 20 процентов от тока основной гармоники соответственно.

2. Построена схема замещения участка железной дороги и модель распределения тока в тяговой сети с учетом возможных вариантов распределения нагрузок в зоне питания. На основе результатов моделирования показано, что распределение токов в контактной сети двухпутного участка с узловым питанием происходит также как и на однопутном участке с поправкой на сопротивление рельсовой сети, которая учитывается в программе расчета наведенного напряжения как коэффициент защитного действия рельса.

3. Разработаны алгоритм и программа расчета распределения наведенного напряжения на отключенной ВЛ, вызванного электромагнитным влиянием контактной сети переменного тока.

4. Создана база данных линий класса напряжения 110-150 кВ Кольского полуострова и влияющих на них участков Октябрьской железной дороги переменного тока.

5. По разработанной программе проведены многовариантные расчеты наведенного напряжения на отключенных ВЛ с учетом различных схем заземления линий и количества нагрузок на влияющем участке железной дороги. Анализ результатов расчетов показал, что наихудшим будет случай, когда электровоз проходит напротив места ремонта на заземленной по концам линии, расположенного посередине участка сближения. При увеличении нагрузок в зоне питания максимум наведенного напряжения на линии смещается в сторону наибольшей нагрузки.



6. Выполнены контрольные измерения наведенных напряжений на отключенной ВЛ класса напряжения 110 кВ, находящейся в зоне влияния однопутного участка Октябрьской железной дороги, которые показали, что разработанную программу можно использовать для определения наведенных напряжений на ремонтируемых линиях.

7. Выполнены расчеты наведенного напряжения для экспериментальной модели сближения ВЛ с однопутным участком железной дороги в программе АТР-ЕМТР. Проведено сравнение отличий расчетных данных наведенного напряжения, полученных с помощью разработанной программы и программы АТР-ЕМТР, относительно опытных данных, которое показало незначительные различия между ними.

8. Определен наиболее эффективный способ защиты ремонтного персонала во время работ на отключенной воздушной линии электропередачи, подверженной влиянию тяговой сети переменного тока, который заключается в заземлении линии только в месте ремонта, что позволяет снизить уровень наведенного напряжения до допустимого значения в этом месте даже при достаточно высоком сопротивлении заземлителя.

## **Публикации**

### **Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. Дроздова О.В., Якубович М.В. Исследование влияния системы тягового электроснабжения переменного тока на отключенные линии электропередачи // Вестник МГТУ, том 13, №4/2, 2010 г. стр.918-922.

2. Залесова О.В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // Вестник МГТУ, т. 17, № 1, стр.40-45, 2014.

3. Залесова О.В. Моделирование электромагнитного влияния контактной сети железной дороги на отключенные воздушные линии электропередачи с помощью программы АТР-ЕМТР// Вестник МГТУ, т. 19, № 4, стр.715-722, 2016.

### **Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:**

1. Дроздова О.В., Якубович М.В. Экспериментальные исследования распределения тяговых токов в рельсах и земле // Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети / Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 2008. С. 205 с.

2. Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Залесова О.В., Селиванов В.Н., Якубович М.В. Повышение безопасности работ на линиях под наведенным напряжением // Труды Кольского научного центра РАН. 2010. №1 (1). С. 91-102.

3. Залесова О.В., Якубович М.В. Экспериментальное исследование спектрального состава тока в рельсах // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. №2 (15). С. 97-102.

4. Залесова О.В., Якубович М.В. Наведенные напряжения на отключенных воздушных линиях электропередачи, вызванные воздействием тяговой сети железной дороги переменного тока // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. №7 (26). С. 50-61.

5. Залесова О.В., Прокопчук П.И. Распределение тяговых токов в контактной сети двухпутного участка железной дороги // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. №8 (34). С. 67-71.

6. Залесова О.В., Колобов В.В., Ефимов Б.В. Расчет наведенного напряжения на отключенных линиях электропередачи, вызванных влиянием контактной сети железной дороги, с помощью программы АТР-ЕМТР // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. №12 (35). С. 48-56.

7. Залесова О.В. Теоретическое исследование значений наведенных напряжений на отключенных линиях электропередачи, вызванных влиянием контактной сети железной дороги переменного тока // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19 – 23 сентября 2016, Казань. – В 3 т. Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С.131-134.

---

Подписано в печать 13.04.2018    Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>    Цифровая    Печ.л. 1,0  
Тираж 100 экз.                                  Заказ № 14/04                          печать

---

Типография «Фалкон Принт»  
197101, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, д. 41, литер Б,  
сайт: <http://falconprint.ru>