

На правах рукописи

Якубович Марина Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАВЕДЁННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ОТКЛЮЧЁННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ,
НАХОДЯЩИХСЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ
РАЗВЕТВЛЁННОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2007

Работа выполнена в Филиале Кольского научного центра Российской академии наук – Центре физико-технических проблем энергетики Севера

Научный руководитель:	доктор технических наук Ефимов Борис Васильевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Фоминич Эдуард Николаевич
	доктор технических наук, профессор Титков Василий Васильевич
Ведущая организация:	Открытое акционерное общество «Колэнерго» РАО ЕЭС России

Защита состоится « _____ » _____ 2007 г. в _____ часов в ауд. _____
на заседании диссертационного совета К 212.229.03 в ГОУ ВПО «Санкт-
Петербургский Государственный политехнический университет» по адресу:
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

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

Автореферат разослан « _____ » _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Гумерова Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Теория электромагнитных воздействий, вызванных влиянием действующей высоковольтной сети и внешних перенапряжений на отключённые линии электропередачи (ЛЭП) и системы связи, разрабатывается уже не одно десятилетие. Следует отметить, что многие публикации посвящены влиянию аварийных режимов в действующей сети. В этих случаях в проводе и в земле могут протекать кратковременные токи промышленной частоты с амплитудами до нескольких килоампер, которые создают значительные наведённые напряжения на всех близко расположенных линиях. Такие напряжения могут вызвать повреждения работающих систем связи и безусловно опасны для ремонтного персонала, работающего на отключённых линиях. При условии соблюдения всех мер безопасности при проведении ремонтных работ считается, что вероятность поражения людей при авариях на действующих линиях практически равна нулю. Это подтверждает и практика эксплуатации сетей.

Однако существуют также постоянные наводки от работающих трёхфазных высоковольтных линий, которые вызваны несимметрией фазных токов, а также различием во взаимном расположении проводов влияющей и подверженной влиянию линий. Опасным для ремонтного персонала считается наведённое напряжение свыше 25В в месте проведения ремонта при наибольшем токе во влияющей линии. Так как рекомендуемое нормативными документами измерение наведённых напряжений в различных точках отключённых линий при максимальных токах на всех влияющих линиях далеко не всегда возможно, то в практику эксплуатации сетей всё шире внедряются методики и алгоритмы расчёта наведённых напряжений для всех потенциально опасных случаев сближения линий энергосистемы.

Поскольку реальные трассы неоднородных по длине линий часто имеют сложные конфигурации, в большинстве расчётных методов используются значительные упрощения. Экспериментальная проверка допустимости ряда из них реально может быть осуществлена лишь в отдельных точках сети (на отдельных опорах), что недостаточно для анализа общих погрешностей расчётов. Наиболее естественный путь определения допустимости введения тех или иных допущений – сопоставление с более точными решениями, которое последовательно проводится в диссертационной работе.

В данной работе электромагнитное поле линии электропередачи в произвольной точке пространства рассматривается как электромагнитное поле цепи горизонтальных электрических диполей, и предлагается методика определения продольной наведённой э.д.с., основанная на расчёте векторного и скалярного потенциала поля горизонтального электрического диполя,

расположенного над землёй с конечной проводимостью. Затем рассчитывается распределение токов и напряжений в развёрнутой схеме замещения линий с переменной по амплитуде и фазе продольной э.д.с. Результаты расчётов сопоставляются с контрольными опытными данными и служат основой для выработки рекомендаций по расчёту распределения напряжений в упрощённых схемах замещения непосредственно перед проведением ремонтных работ.

Развитие электрических сетей воздушных ЛЭП, повышение требований к обеспечению безопасности работы оперативно-ремонтного персонала, необходимость предварительной достаточно точной оценки уровней наведённых напряжений на линиях определяют актуальность работы.

Цель работы.

Исследование наведённых напряжений на неоднородных по длине отключённых воздушных линиях при сложных трассах сближения с действующей высоковольтной сетью и разработка мер по повышению безопасности ремонтных работ.

Научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна работы.

1. Получено аналитическое решение для всех составляющих электрического поля (E_x , E_y , E_z) горизонтального диполя, расположенного над землёй с заданным удельным сопротивлением и разработан метод быстрого вычисления горизонтальной составляющей (E_x , E_y)

2. Разработан быстродействующий алгоритм расчёта продольной э.д.с. на участках отключённой линии электропередачи на основе интегрирования полей диполей элементарных зарядов, по длине всех влияющих линий и длине участка отключённой линии.

3. Разработан метод расчёта распределения токов и напряжений в неоднородной линии с переменной продольной э.д.с.

4. Проведено численное исследование погрешностей расчёта наведённых э.д.с. и потенциалов при использовании традиционных методик, и показана допустимость введения некоторых упрощений для инженерных оценок максимальных значений наведённых напряжений.

5. Выполнено исследование наведённых напряжений на примере всех линий энергосистемы, подверженных влиянию соседних ЛЭП, и разработаны рекомендации по повышению безопасности ремонтных работ для линий с различным уровнем наведённых напряжений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются применением достаточно полных математических моделей исследуемых процессов, представительным объемом теоретических и экспериментальных исследований, а также удовлетворительным согласием результатов расчетов с экспериментальными данными.

Практическое значение работы.

1. Предложенная методика расчёта наведённых напряжений позволяет оценить погрешности, вносимые допущениями традиционных методов расчёта (такие, как неучёт концевого эффекта и сведение косоугольного сближения линий к кусочно-параллельному), а, следовательно, определить границы применения этих методов.

2. Разработан программный комплекс, позволяющий быстро и достаточно точно определить распределение наведённых напряжений на любой линии, подверженной влиянию, при заданных нагрузках на влияющих ЛЭП.

3. Исследовано влияние действующей сети на отключённые линии электропередачи в рамках целой энергосистемы, что позволило классифицировать линии с точки зрения безопасности работ и сформулировать рекомендации по обеспечению безопасности работы оперативно-ремонтного персонала

Реализация результатов работы. На основе разработанных методов расчетов, а также результатов проведённых расчётных и экспериментальных исследований наведённых напряжений на линиях отдельной региональной энергосистемы были подготовлен и внедрён программный комплекс для расчёта наведённых напряжений на линиях сетевых предприятий, а также разработаны рекомендации по обеспечению безопасности ремонтных работ на линиях ОАО «Колэнерго».

Апробация работы. Результаты работы докладывались на российских научно-технических конференциях по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности (в 2000, 2004, 2006 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 1 – в реферируемом журнале.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, включает 130 страниц основного текста, 34 рисунка, 26 таблиц и список литературы из 53 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика проблемы исследования наведённых напряжений и обоснована актуальность работы.

В главе 1 проведён анализ рекомендаций и требований нормативных документов, относящихся к обеспечению безопасности работы ремонтного персонала при наличии наведённых напряжений, рассмотрены существующие методы расчёта наведённых напряжений, сформулирована цель диссертационной работы и обозначены подходы к решению проблемы.

Практически невозможно опытным путём (при максимальных токах во влияющей сети, как это рекомендуют нормативные документы) найти зоны линий электропередачи, на которых наведённые напряжения могут превышать допустимые значения. Необходимо учитывать, что часто наведённые напряжения создаются несколькими влияющими линиями, сближающимися с ремонтируемой ЛЭП одновременно или попеременно на разных участках её трассы. В таких случаях наведённые напряжения являются результатом сложного суммарного действия всех влияющих ЛЭП. Выделить вклад каждой из них только по результатам измерений нельзя, а без нахождения этого вклада пересчёт от нагрузок, действующих в сети во время измерений, к максимальным становится невозможным. Таким образом, важное значение для обеспечения безопасной работы ремонтного персонала на отключённых линиях электропередачи приобретает расчётная оценка возможных величин наведённых напряжений во всех местах проведения ремонтов при изменяющихся нагрузках в сети.

Описанные в литературе подходы к определению электромагнитного поля линий электропередачи, а также нахождению взаимных сопротивлений между проводами ЛЭП и величин наведённых напряжений можно разделить на следующие группы:

- путём решения волнового уравнения линии;
- путём решения системы телеграфных уравнений многопроводной системы;
- определение наведённых напряжений через расчёт взаимных сопротивлений между проводами действующей и отключённой линий.

Анализ публикаций, посвящённых проблеме наведённых напряжений, показал, что во всех практических методах расчёта используется целый ряд допущений и упрощений. При этом лишь в отдельных работах даётся оценка некоторых погрешностей расчёта, вносимых данными допущениями.

В существующих условиях представляется целесообразной разработка уточнённой методики расчёта, снимающей ряд основных допущений. Ввиду её усложнения по сравнению с традиционными методиками (из-за резкого увеличения числа исходных данных по геометрии линий и параметрам грунта по трассам сближения, а также требования по точности определения этих данных), она должна быть эталонной для оценки погрешностей и рекомендаций области применения более простых способов расчёта. Учитывая теоретически обоснованные приближения, можно создать базу данных на основе упрощённых схем сближения для многих десятков линий энергосистемы, а также экспериментально проверить точность расчётов для ряда линий и конкретных режимов работы сети. Конечной целью исследований

должна стать простая в эксплуатации информационно-аналитическая система, позволяющая быстро находить распределение наведённых напряжений по всей длине ремонтируемой линии при любых возможных нагрузках, сделать вывод о безопасности работ или о необходимости использования особых мер по снижению наведённых напряжений в месте ремонта.

Описанный подход последовательно излагается в диссертационной работе. Все математические результаты и разработанные алгоритмы доведены до стадии численных расчётов и программ в системе Mathcad-2000 и на языке Visual Fortran-90 (с использованием библиотеки стандартных программ IMSL) и внедрены на сетевых предприятиях ОАО “Колэнерго”.

Всё вышесказанное позволило сформулировать основные задачи работы:

- нахождение решения уравнений электромагнитного поля линии электропередачи в произвольной точке пространства на основе решения для поля горизонтального электрического диполя над поверхностью земли;
- разработка алгоритма и программы расчёта распределения наведённого напряжения на отключённой линии, на основе расчёта векторного и скалярного потенциала поля горизонтального диполя;
- сравнение расчётов по разработанной программе с результатами приближённых расчётов наведённых напряжений;
- анализ погрешностей расчётов наведённых напряжений, вызванных пренебрежением концевым эффектом на отдельных участках линий и приведением трасс сближения к кусочно-линейному варианту; разработка рекомендаций по использованию приближённых методов в практике эксплуатации энергосистем;
- исследование распределения наведённых напряжений по длине отключённых линий для всех линий электропередачи Кольской энергосистемы, подверженных влиянию.

Во второй главе приведена методика оценки наведённых напряжений в простейших случаях сближения, сформулированы общие допущения уточнённой методики расчёта наведённых напряжений, определены составляющие векторного потенциала поля горизонтального диполя, получены общие выражения для составляющих напряжённости электрического поля горизонтального диполя, проведён анализ составляющих напряжённости электрического поля для низких частот, описаны методика и алгоритм многократного вычисления интегралов, входящих в выражения для составляющих поля, а также методика расчёта взаимных потенциальных коэффициентов между проводами влияющей и отключённой линий.

Для определения электромагнитного поля линии электропередачи в произвольной точке пространства трассы проводов влияющих линий

представляются в виде непрерывных цепочек горизонтальных электрических диполей, расположенных над однородной (в пределах некоторого участка по длине линии) землей по произвольной криволинейной трассе. Поле линии электропередачи рассматривается как суперпозиция полей элементарных диполей, её образующих. Напряжённость поля диполя выражается через векторный и скалярный потенциал.

Рассматриваемый диполь (рисунок 1) расположен в точке $z = h$ на оси z и ориентирован в x -направлении. Декартовы координаты выбраны так, что плоскость $z = 0$ соответствует поверхности земли, а полупространство $z > 0$ занимает верхняя непроводящая область с параметрами (ϵ_0, μ_0) . Верхнее полупространство полагается изотропным, а нижнее может быть как изотропным, так и анизотропным.

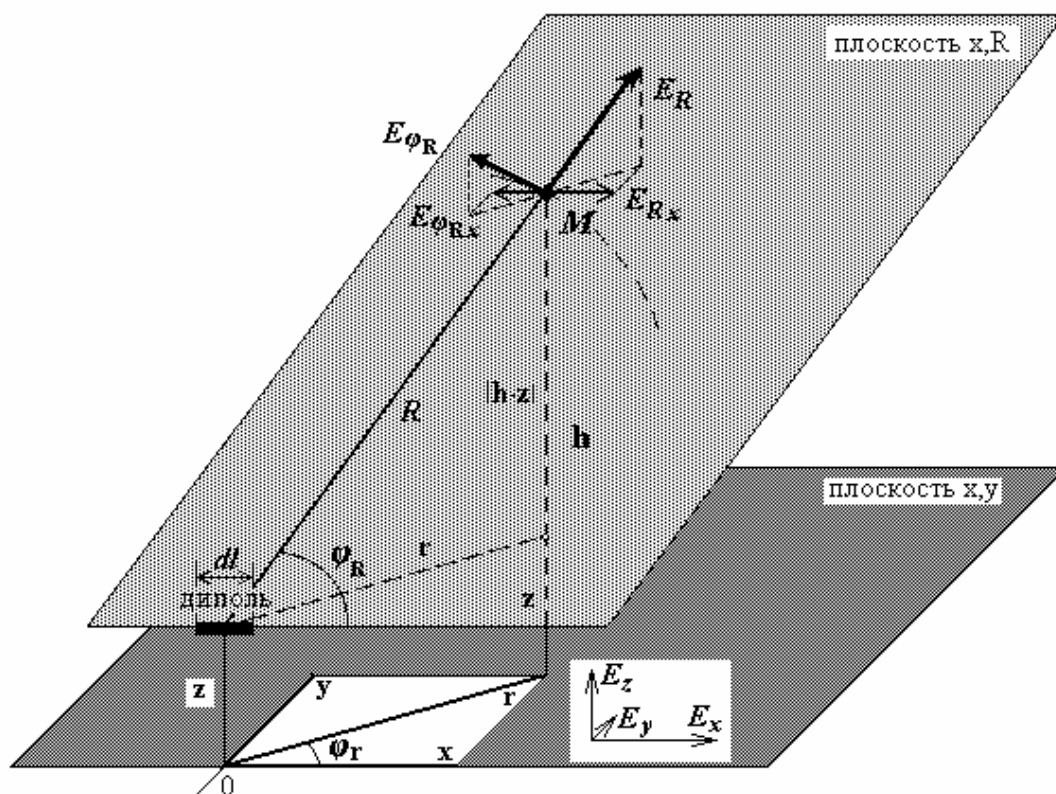


Рисунок 1. Координаты диполя и расчётной точки (M) в плоскости раздела сред земля-воздух (плоскость x,y) и в плоскости, заданной осью x и прямой, соединяющей середину диполя с точкой M (плоскость x,R)

Дж. Уэйтом получены формулы для составляющих электрического поля диполя в верхнем полупространстве ($z > 0$) как функций векторного потенциала. Однако эти общие выражения непригодны для конкретных расчётов, поскольку значения компонент векторного потенциала неизвестны.

На основе этих формул автором получены выражения для компонент напряжённости электрического поля как функций координат в общем случае. Они представляют собой громоздкие, но вполне реализуемые на современных компьютерах выражения для расчёта всех составляющих электрического поля горизонтального диполя в воздухе:

$$\begin{aligned}
E_{0x} = & \frac{1}{j\varepsilon_0\omega} \cdot \left[-\gamma_0^2 \cdot K \int_0^\infty P_x(\lambda, z) \cdot J_0(\lambda r) d\lambda \right] + \\
& + \frac{1}{j\varepsilon_0\omega} \cdot K \int_0^\infty [u_0 P_z(\lambda, z) - P_x(\lambda, z)] \cdot \left(\frac{\lambda x}{r} \right)^2 J_0(\lambda r) d\lambda + \\
& + \frac{1}{j\varepsilon_0\omega} \cdot K \int_0^\infty [u_0 P_z(\lambda, z) - P_x(\lambda, z)] \cdot \frac{\lambda(y^2 - x^2)}{r^3} J_1(\lambda r) d\lambda; \quad (1)
\end{aligned}$$

$$E_{0y} = \frac{1}{j\varepsilon_0\omega} \cdot K \int_0^\infty \left[\frac{\lambda^2 xy}{r^2} J_0(\lambda r) - \frac{2\lambda xy}{r^3} J_1(\lambda r) \right] \cdot [u_0 P_z(\lambda, z) - P_x(\lambda, z)] d\lambda; \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
E_{0z} = & \frac{1}{j\varepsilon_0\omega} \cdot \left[\gamma_0^2 \cdot K \int_0^\infty P_z(\lambda, z) \cdot \frac{\lambda x}{r} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda \right] - \\
& - \frac{1}{j\varepsilon_0\omega} \cdot K \cdot \int_0^\infty \frac{\lambda x}{r} J_1(\lambda r) \cdot u_0 \cdot [u_0 P_z(\lambda, z) - P_x'(\lambda, z)] d\lambda. \quad (3)
\end{aligned}$$

где $P_x(\lambda, z) = \frac{\lambda}{u_0} \cdot \left[e^{-u_0|z-h|} + R_\perp(\lambda) e^{-u_0(z+h)} \right];$

$$P_z(\lambda, z) = S(\lambda) \cdot e^{-u_0(z+h)};$$

$$K = \frac{Idl}{4\pi}.$$

$$P_x'(\lambda, z) = \frac{\lambda}{u_0} \left[\pm e^{-u_0|z-h|} + R_\perp(\lambda) \cdot e^{-u_0(z+h)} \right]$$

$$R_\perp(\lambda) = \frac{u_0 - u}{u_0 + u};$$

$$S(\lambda) = \frac{2u \left(u - \frac{\gamma_0^2}{\gamma^2} v \right)}{\lambda \left(u_0 + \frac{\gamma_0^2}{\gamma^2} v \right) (u_0 + u)};$$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние от середины диполя до расчётной точки в плоскости, параллельной плоскости земли;

$$u_0 = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_0^2} ; u = \sqrt{\lambda^2 + \gamma^2} ;$$

$\gamma_0^2 = -\varepsilon_0 \mu_0 \omega^2$ – комплексная постоянная распространения в воздухе;

$\gamma^2 = j\mu_0 \omega \hat{\sigma}$ – комплексная постоянная распространения в грунте;

$\hat{\sigma} = \sigma + j\varepsilon\omega$ – комплексная проводимость грунта;

ε – эквивалентная диэлектрическая проницаемость грунта;

$J_0(\lambda r)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

$J_1(\lambda r)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

$I dl$ – момент диполя.

Как будет показано далее, слагаемые, входящие в эти выражения, имеют ясный физический смысл.

В данной работе основное внимание уделено составляющей электрического поля, параллельной оси диполя, то есть E_x . Преобразования выражений для E_y аналогичны выкладкам для E_x и подробно не рассматриваются. Вертикальная составляющая поля E_z в данной работе далее не используется.

Составляющая электрического поля E_x может быть выражена следующим образом:

$$E_x = \frac{-\gamma_0^2}{j\omega \cdot \varepsilon_0} A_x - \text{grad}_x U = E_x^A + E_x^U = E_x^A + E_{x2}^U + E_{x3}^U, \quad (4)$$

где E_x^A – слагаемое, определяемое производной по времени от векторного потенциала, или первым интегралом в выражении (1) для E_x ;

$E_x^U = E_{x2}^U + E_{x3}^U$ – слагаемые, определяемые градиентом скалярного потенциала, или вторым и третьим интегралами в выражении (1) для E_x .

При этом слагаемое E_x^A для диполя над землей с конечной проводимостью:

$$E_x^A = E_{xB}^A + \Delta E_{x3}^A = -\frac{j\omega\mu_0 \cdot I \cdot dl}{4\pi} \left[\left(\frac{e^{-\gamma_0 R_1}}{R_1} - \frac{e^{-\gamma_0 R_2}}{R_2} \right) + \int_0^\infty \frac{2\lambda e^{-u_0(z+h)}}{u_0 + u} J_0(\lambda r) d\lambda \right]. \quad (5)$$

Здесь: R_1 – расстояние от середины диполя до расчётной точки;

R_2 – расстояние от середины отражения диполя до расчётной точки;

Знаки слагаемых в (5) учитывают направления токов диполя и его отражения. Здесь E_{xB}^A (слагаемое в круглых скобках) – поле, созданное диполем над идеально проводящей землей, интеграл – поправка на конечную проводимость земли.

Для E_x^U получены аналогичные выражения, описывающие поле диполя над идеально проводящей землёй и поправку на конечную проводимость земли.

Сопоставление полученных в данной работе выражений для слагаемых E_x^A , с обычно применяемыми формулами для составляющих поля диполя в сферических координатах показало их полное совпадение при преобразовании сферических координат в декартовы с помощью матрицы простых вращений. Для слагаемых E_x^U преобразование выражений не проводилось, но были выполнены численные расчёты, полностью совпавшие с расчётами по традиционным формулам.

Уже на примере поля одиночного диполя можно оценить влияние уточнений, вносимых учётом конечной проводимости земли. Проведённый теоретический и численный анализ слагаемых, входящих в E_x^A и E_x^U , показал, что учёт конечной проводимости земли важен в первую очередь для E_x^A . Влияние конечной проводимости земли на E_x^U заметно сказывается только на очень высоких для энергетических задач частотах и при больших расстояниях от диполя. Поправка на конечную проводимость земли для E_x^A невелика лишь при малых расстояниях (до нескольких десятков метров), а при дальнейшем удалении от диполя она становится определяющей в наведённой продольной э.д.с. С увеличением удельного сопротивления грунта влияние интегральной составляющей усиливается. Зависимость ΔE_{x3}^A от частоты – обратная. С ростом частоты сильнее сказывается поверхностный эффект в земле и задача расчёта поля диполя над грунтом с $\rho > 0$ постепенно приближается к условиям идеально проводящей земли.

В области низких частот, которая определяется двумя условиями:

$$|\gamma_0| \cdot R \rightarrow 0 \text{ и } \frac{|\gamma_0|}{|\gamma|} \rightarrow 0, \quad (6)$$

выражения для U - и A - составляющих напряжённости электрического поля значительно упрощаются:

$$E_x^U = \frac{I \cdot dl}{j\omega \cdot 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right). \quad (7)$$

$$E_x^A = -\frac{j\omega\mu_0 \cdot I \cdot dl}{4\pi} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \int_0^\infty \frac{2\lambda e^{-\lambda(z+h)}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega \cdot \mu_0}{\rho}}} J_0(\lambda, r) d\lambda \right] \quad (8)$$

Таким образом, поправка на конечную проводимость земли оказывается равной

$$\begin{aligned} \Delta E_{x3}^A &= -\frac{j\omega\mu_0 \cdot I \cdot dl}{4\pi} \int_0^\infty \frac{2e^{-\lambda(z+h)} \cdot \lambda J_0(\lambda, r)}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega \cdot \mu_0}{\rho}}} d\lambda = \\ &= -\frac{j\omega\mu_0 \cdot I \cdot dl}{4\pi} \cdot F(z, h, \omega, \rho, r). \end{aligned} \quad (9)$$

Структура (9) повторяет структуру интегральной поправки в продольной составляющей напряжённости поля по Карсону (для линии бесконечной длины), учитывающей конечную проводимость земли:

$$E_x = \Delta Z_{12} \cdot I = -\frac{j\omega\mu_0 \cdot I \cdot dl}{2\pi} \int_0^\infty \frac{2e^{-\lambda(h_1+h_2)} \cdot \cos \lambda b_{12}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega \cdot \mu_0}{\rho}}} d\lambda. \quad (10)$$

где ΔZ_{12} – добавка к погонному сопротивлению, вызванная проникновением магнитного поля в землю;

h_1 и h_2 – высоты подвеса проводов (эквивалент z и h в (9));

b_{12} – расстояние между проводами по горизонтали (эквивалент r в плоскости x, y для диполей).

Отличия между (9) и (10) характерны для перехода от трёхмерной задачи к плоскопараллельному случаю. В остальных моментах обе задачи полностью аналогичны. Мало того, интегрирование (9) вдоль прямой, параллельной оси диполя даёт результаты, совпадающие с расчётами по (10).

Следует отметить, что решение через поле диполя является значительно более общим. Во-первых, оно справедливо для любой, а не только низкой частоты. Во-вторых, его можно использовать при любом взаимном расположении отрезков проводов конечной длины.

Анализ численных значений погрешностей перехода от общей формулы к низкочастотному приближению ($\gamma_0=0$), выполненному в преобразовании (8), для разных расстояний между диполем и точкой наблюдения ($y=const=5$ м; $x=var$), показал, что при уменьшении расстояния до точки наблюдения область

использования низкочастотного приближения значительно расширяется, постепенно переходя из области высших гармонических промышленной частоты к частотам коммутационных и затем атмосферных перенапряжений.

На рисунке 2 приведены результаты расчёта границы 5-процентной погрешности в координатах: частота – расстояние до точки наблюдения вдоль прямой, параллельной оси диполя для $\rho=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

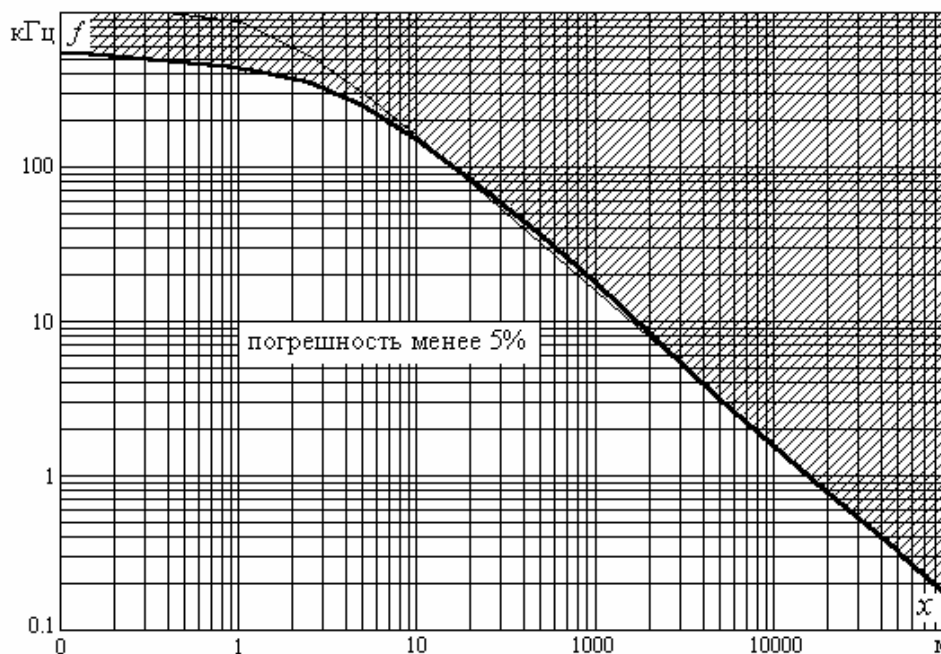


Рисунок 2. Граница 5-процентной погрешности расчёта поправки на влияние земли

Численное исследование погрешностей при различных удельных сопротивлениях и емкостях грунта, высотах расположения диполей и точек наблюдения, расстояниях от диполя до прямой, параллельной его оси (y) показало, что для одиночного диполя, за исключением расстояний в десятки метров и менее, погрешность введения $\gamma_0=0$ определяется пренебрежением влиянием волновых процессов в воздухе, т.е. первым из условий (6) низкочастотного приближения. С запасом можно считать, что двукратное снижение частоты по сравнению с кривой рисунка 2 даёт границу погрешности введения низкочастотного приближения не превышающую единиц процентов в любом расчётном случае.

Основной вычислительной трудностью при практическом применении теории диполей к задачам расчёта наведённых напряжений при сложных трассах сближения отключённой и влияющих линий является многократное вычисление добавки на конечную проводимость земли (9), которая содержит

неберущийся в элементарных функциях интеграл $F(z, h, \omega, \rho, r)$, где подынтегральная функция состоит из двух сомножителей:

$$P_1(\lambda, z+h, \omega, \rho) = \frac{2e^{-\lambda(z+h)} \cdot \lambda}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega \cdot \mu_0}{\rho}}} \quad \text{и} \quad P_2(\lambda, r) = J_0(\lambda r) \quad (11)$$

которые зависят от λ совершенно различным образом. В частности, график зависимости $J_0(\lambda r)$ от λ имеет колебательный характер.

С помощью одного из методов исключения колебательной составляющей в процессе интегрирования было получено выражение для всего исходного интеграла из (9) в следующей форме:

$$F(z, h, \omega, \rho, r) \approx \frac{1}{r} \sum_{i=1}^{i=n-2} [\lambda_{i+1} \cdot (A_i - A_{i+1}) (J_1(\lambda_{i+1}r) - F_{J_0}(\lambda_{i+1}r))] \quad (12)$$

где A_i – коэффициент отрезка прямой $A_i \cdot \lambda + B_i$, аппроксимирующего апериодическую часть подынтегральной функции на участке $\lambda_i \div \lambda_{i+1}$;
 $F_{J_0}(\lambda_{i+1}r)$ – интеграл функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

Разность $J_1(\lambda_{i+1}r) - F_{J_0}(\lambda_{i+1}r)$ можно определить либо с помощью рядов, либо путём интегрирования асимптотических выражений для функций Бесселя. В первом случае имеем следующую формулу:

$$\begin{aligned} J_1(\lambda_{i+1}r) - F_{J_0}(\lambda_{i+1}r) &= \\ &= -\frac{z}{2} - \frac{z^3}{2^2} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3} \right) + \frac{z^5}{2^2 \cdot 4^2} \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{5} \right) - \frac{z^7}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{7} \right) + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

где $z = \lambda_{i+1}r$

Это выражение даёт достаточно точные результаты лишь при $0 < z < 25$.

Во втором случае для вычисления функции Бесселя первого порядка используется стандартная программа из библиотеки программ IMSL языка Фортран. Вычисление интеграла функции Бесселя нулевого порядка выполняется следующим образом:

$$\int_0^{\infty} J_0(z) dz = \int_0^{z_1} J_0(z) dz + \int_{z_1}^{\infty} J_0(z) dz = F_{J_01} + F_{J_02} \quad (14)$$

где F_{J_01} вычисляется с помощью рядов, F_{J_02} – путём интегрирования асимптотики функции Бесселя нулевого порядка $J_0(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos(z - \frac{\pi}{4})$.

Используя косинус- и синус- интегралы Френеля ($C(z_1)$ и $S(z_1)$) второй интеграл в выражении (14) при $z_1 \rightarrow \infty$ можно записать в виде:

$$\int_{z_1}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos\left(z - \frac{\pi}{4}\right) dz = \sqrt{2} - \sqrt{2}(C(z_1) + S(z_1)) \quad (15)$$

Этот способ расчёта применяется при $z > (25-30)$, поскольку даёт в этой области достаточную точность и приемлемые затраты машинного времени.

В итоге алгоритм многократного вычисления интеграла выражения (9) выглядит следующим образом:

1. Задаются верхний и нижний пределы интегрирования (например, 10^{-7} , 10).
2. Задаётся постоянный в логарифмическом масштабе шаг по λ (например $\Delta_{\log \lambda} = 1.365$). При этом следующая точка по λ вычисляется как $\lambda_{i+1} = \lambda_i \cdot \Delta_{\log \lambda}$. Для описания поведения апериодической части подынтегральной функции во всём заданном диапазоне (от 10^{-7} до 10) требуется 60 точек по λ .
3. Один раз для всех диполей, рассматриваемых в задаче, вычисляются коэффициенты A_i и $\Delta A_i = A_i - A_{i-1}$. Последние запоминаются для многократного использования.
4. Задаются координаты точки наблюдения и диполя, вычисляется расстояние между ними и для всех λ_i вычисляется или ряд (13) или выражение (12) с учётом (15).
5. Пункт 4 повторяется для заданной точки наблюдения для всех диполей. Это определяет напряжённость электрического поля в заданной точке.
6. Пункты 4 и 5 повторяются для всех заданных точек. Например, вдоль трассы отключённой линии, что с учётом пространственного угла между диполем и линией даёт решение задачи о распределении наведённой продольной э.д.с. вдоль ЛЭП.

Для расчёта взаимных потенциальных коэффициентов между проводами влияющей и отключённой линии, через которые определяется потенциальная (электростатическая) составляющая наведённых напряжений, в данной работе используется метод Хоу, который, как известно, даёт достаточно точные результаты для линейных проводников. Данный метод предполагает постоянную линейную плотность заряда по длине отрезка линии конечной длины. Это допущение используется в данной работе. Однако интегралы по длинам участков вычисляются с учётом всех неоднородностей трасс.

В третьей главе проводится численное исследование погрешностей расчёта наведённых э.д.с. и потенциалов на основе интегрирования полей диполей элементарных зарядов при различных вариантах сближения: 1) при

параллельном сближении линий конечной длины, 2) при параллельном сближении двух бесконечных однопроводных линий, 3) при косом сближении двух однопроводных линий.

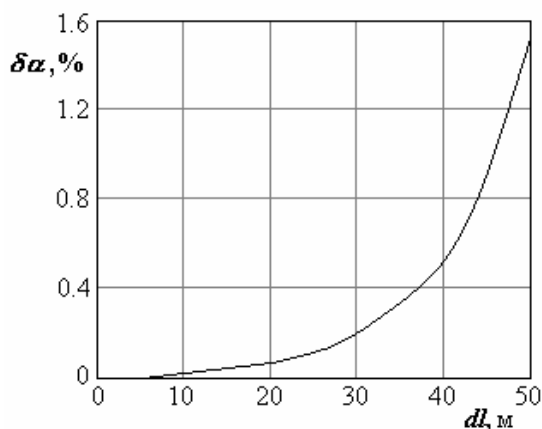
В первом случае исследовалось влияние длины диполя Δl на точность расчёта потенциальных коэффициентов (α) и наведённых продольных э.д.с. (E_l) при трёх вариантах параллельного расположения однопроводных линий: на расстоянии 50 м и 5 м по горизонтали, а также – 5 м по вертикали (влияющий провод над исследуемым). Средняя высота расположения проводов над поверхностью земли была выбрана равной 10 м, удельное сопротивление грунта (ρ) принято равным 1000 Ом·м. Многочисленные расчёты для различных конфигураций трасс сближения реальных линий показали, что уменьшение Δl менее одного метра уточняет результаты счёта в четвёртой-восьмой значащих цифрах, поэтому значение $\Delta l = 1$ м было выбрано в качестве эталонного.

Графики зависимостей относительных погрешностей расчёта потенциальных коэффициентов и наведённых продольных э.д.с. от шага интегрирования (длины диполя) приведены для первого случая расположения проводов на рисунке 3.

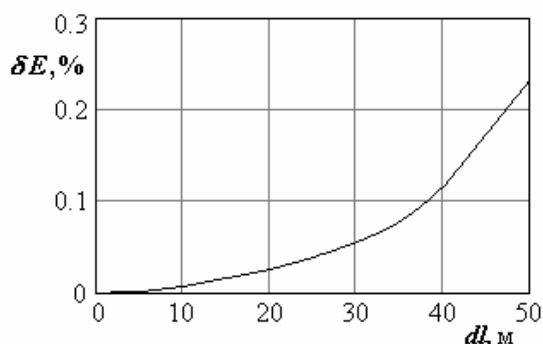
Результаты расчётов позволяют сделать вывод, что для всех рассмотренных случаев расположения проводов оптимальным шагом интегрирования может считаться шаг, равный расстоянию между проводами (для первого варианта – 50 м, для второго и третьего – 5 м). Использование такого шага не требует больших затрат машинного времени, что позволяет использовать его в массовых расчётах. С другой стороны, погрешность расчёта при этом не превышает 5%.

Для определения степени влияния краевого эффекта при расчёте напряжённости электрического поля E_l были исследованы два варианта:

1. Два параллельных участка сближения линий: РЛ длиной 1 км и ВЛ, равная длине РЛ; РЛ длиной 1 км и ВЛ длиной 101 км.



а)



б)

Рисунок 3. Зависимость относительной погрешности расчёта от длины диполя при горизонтальном расположении параллельных проводов на расстоянии 50 м.

а) потенциальных коэффициентов; б) наведённой продольной э.д.с.

2. Два параллельных участка сближения линий: РЛ различной длины и ВЛ, равная длине РЛ; РЛ различной длины и ВЛ длиной 101 км.

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости обусловленных концевым эффектом относительных погрешностей расчёта продольной наведённой э.д.с. E_i для двух указанных выше случаев сближения линий.

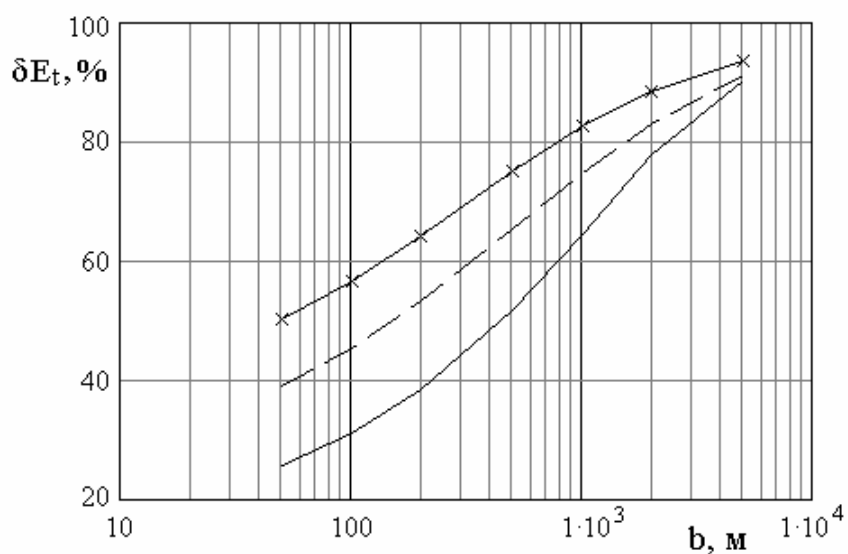


Рисунок 4. Зависимость относительного влияния концевого эффекта от расстояния между линиями.

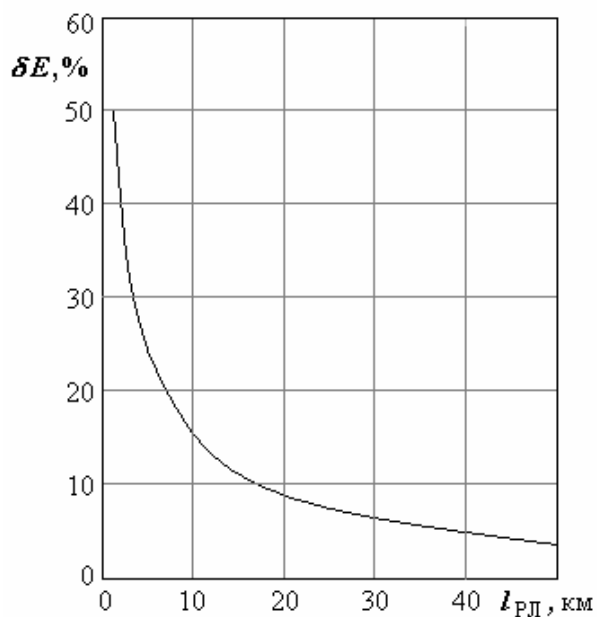


Рисунок 5. Зависимость относительного влияния концевого эффекта от длины ремонтируемой линии.

В четвертой главе описана методика расчёта распределения токов и напряжений в схемах замещения отключённых линий, описана однопроводная схема замещения отключённой линии, рассмотрены преимущества и недостатки программных комплексов с разным представлением исходной информации и описана формализация исходной информации в разработанном программном комплексе.

Алгоритм расчёта распределения наведённых напряжений на отключённой линии состоит в следующем: сначала создаётся схема замещения линии, состоящая из n П-образных звеньев, каждое из которых замещает участок линии, где геометрию самой линии и возможных влияющих линий (ВЛ) можно считать постоянной. Рассчитываются элементы схемы замещения. Далее составляется система уравнений на основе законов Кирхгофа, описывающая распределение токов в полученной цепной схеме. В матричном виде систему этих уравнений относительно токов в проводе РЛ и токов на землю можно записать: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{F}$, где \mathbf{F} – матрица-столбец токов источников тока в узлах схемы и э.д.с. на её участках. В матрице \mathbf{A} ненулевыми являются только главная диагональ ($\mathbf{A}_{i,i}$), наддиагональ ($\mathbf{A}_{i,i+1}$) и поддиагональ ($\mathbf{A}_{i-1,i}$), которые сохраняются в трёх массивах. Затем в отдельный массив отбираются искомые токи, расположенные в порядке, соответствующем вектору \mathbf{I} . Напряжения в узлах определяются как произведения найденных токов с одинаковыми первым и вторым индексом и соответствующих сопротивлений на землю, то есть для i -го узла напряжение по отношению к земле будет: $U_{i,i} = Z_{i,r} I_{i,i}$.

Разработанный программный комплекс отличается от ранее созданного (также с участием автора данной работы) способом хранения исходной информации. Ранее для этой цели использовались базы данных СУБД FoxPro 2.0-2.6. Теперь информация о параметрах ремонтируемой и влияющих линий хранится в отдельных файлах – по два файла для каждой исследуемой линии. В первом файле содержится информация для типовых расчётов: сопротивления заземления по концам линии, номер провода ремонтируемой линии, расстояние от начала линии до места ремонта, сопротивление заземления в месте ремонта а также номера влияющих линий и нагрузки на них. Остальная информация, касающаяся редко изменяемых параметров (геометрия сближений, активные сопротивления проводов и т.д.) находится во втором файле. Такая организация данных делает программный комплекс более удобным и простым в использовании.

В пятой главе приведены результаты исследования наведённых напряжений в рамках целой энергосистемы, дана общая характеристика исследуемой энергосистемы, проведена классификация линий с точки зрения безопасности

ремонтных работ, сформулированы рекомендации по повышению безопасности ремонтных работ для линий с различным уровнем наведённых напряжений.

Исследование влияния действующей сети на отключённые линии электропередачи проводилось для одной из типичных энергосистем России, расположенной на Кольском полуострове. Всего расчётным путём было проанализировано 158 линий ОАО “Колэнерго”. В их число входят как линии, имеющие простейшие случаи сближения, так и линии со сложными трассами сближений, в том числе ЛЭП, имеющие двухцепные участки, транспозиции и случаи одновременного или поочерёдного влияния двух и более линий.

На всех влияющих линиях задавался максимальный ток, который принимался равным допустимому по нагреву проводов и определялся по таблицам.

По результатам расчётов исследуемые ЛЭП были разделены на три группы и для каждой из них даны общие рекомендации по обеспечению безопасности работы оперативно-ремонтного персонала:

1. Линии, на которых максимальное напряжение в любой точке не превышало 25В. Для этих линий достаточно применения обычных мер безопасности: заземление по концам и в месте ремонта

2. Линии, на которых напряжение превышало 25 В, но доминирующее влияние оказывала только одна ВЛ. Для них построены графики, показывающие зависимость расположения и длины опасной зоны от нагрузки на влияющей линии. Пример графика приведён на рисунке 6.

3. Линии, на которых опасное влияние возникает от воздействия нескольких ВЛ, токи в которых создают сравнимые наведённые напряжения. Для таких линий существование участков, где напряжение превышает 25 В, необходимо определять с помощью расчёта, задавая реальные нагрузки на всех влияющих ЛЭП.

Контрольные измерения наведённых напряжений, проведённые на ряде линий, дали удовлетворительное совпадение с расчётными данными, что подтвердило возможность применения программного комплекса для предварительной оценки уровней наведённых напряжений на линиях.

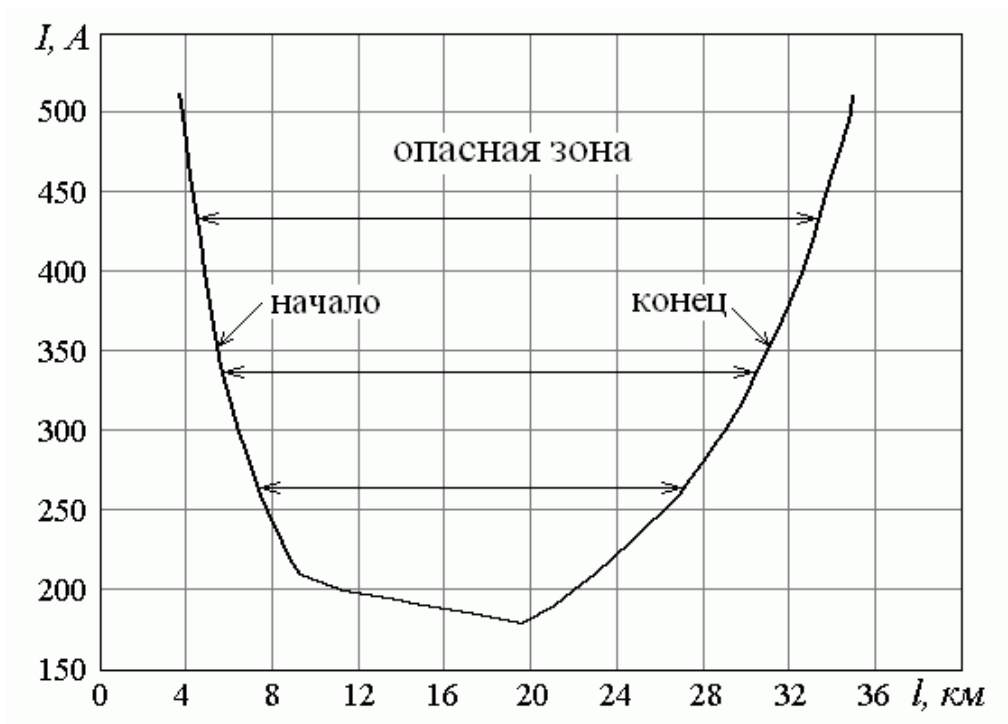


Рисунок 6. Зависимость длины опасной зоны на ремонтируемой линии 92 от величины тока, протекающего во влияющей линии 93

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Получено решение уравнений электромагнитного поля неоднородной по длине линии электропередачи в произвольной точке пространства на основе решения для поля горизонтального электрического диполя, расположенного над поверхностью земли.

2. Разработаны алгоритм и программа расчёта распределения наведённого напряжения на отключённой линии, базирующиеся на расчёте векторного и скалярного потенциала поля горизонтального диполя.

3. Проведены многовариантные расчёты по разработанной программе и сравнение их результатов с результатами приближённых расчётов наведённых напряжений.

4. Выполнен анализ погрешностей расчётов наведённых напряжений, вызванных пренебрежением концевым эффектом и приведением трасс сближения к кусочно-линейному варианту, и показана допустимость введения этих упрощений для инженерных оценок максимальных значений наведённых напряжений.

5. Выполнены контрольные измерения наведённых напряжений на отключённых линиях электропередачи, находящихся в зоне влияния действующей высоковольтной сети и произведено сопоставление опытных и расчётных данных, показавшее удовлетворительную точность математического моделирования.

6. Разработан информационно-аналитический программный комплекс, состоящий из базы данных по взаимному расположению трасс всех линий ОАО "Колэнерго", имеющих участки взаимного сближения, а также расчётный блок, позволяющий в эксплуатации максимально просто получать распределение напряжений вдоль любой из линий при нагрузках сети, соответствующих ремонтному периоду.

7. Исследовано распределение наведённых напряжений по длине отключённых линий для всех линий электропередачи Кольской энергосистемы, подверженных влиянию, и разработаны конкретные рекомендации по обеспечению безопасности работ в любой из точек этих линий.

Всего рассмотрено 158 линий. Получено, что на девяноста линиях (57%) даже при максимальных (по нагреву проводов) токах во влияющей сети напряжение не превышает допустимое. Десять линий или 6.3% подвержены преобладающему влиянию только одной из ЛЭП. Для этих линий определены опасные зоны в зависимости от нагрузки на влияющей линии. Работы на остальных пятидесяти восьми линиях (36.7%) требуют проведения предварительных расчётов по разработанной программе перед выездом бригады ремонтников на линию.

8. С точки зрения снижения наведённых напряжений во всех случаях можно рекомендовать после заземления в месте ремонта разземление линии по концам. В случае, когда и это мероприятие (при реальных нагрузках в сети) не даёт должного эффекта, необходимо проводить работы на линии как работы без снятия напряжения.

9. Комплекс программ и результаты исследования переданы в сетевые предприятия ОАО "Колэнерго".

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Ефимов Б.В., Фастий Г.П., Якубович М.В. Анализ наведённых напряжений и мер по обеспечению безопасности работ на ремонтируемых линиях электропередачи, находящихся в зоне влияния действующей сети // Сборник докладов шестой Российской научно-технической конференции "Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов". – С.-Петербург. – 2000. – С.164-168.

2. Ефимов Б.В., Фастий Г.П., Якубович М.В. Наведённые напряжения на воздушных линиях при неоднородных трассах сближения // Электрические станции. – 2002. – №8. – С.32-38.

3. Ефимов Б.В., Якубович М.В. Трёхмерное электромагнитное поле неоднородной воздушной линии электропередачи: Препр.: Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. – 2003. – 51 с.

4. Ефимов Б.В., Якубович М.В. Методика расчета наведённых напряжений на отключённых линиях электропередачи при неоднородных трассах сближения с высоковольтной сетью // Сборник докладов восьмой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. – С-Петербург. – 2004. – С. 95-99.

5. Якубович М.В. Влияние железной дороги переменного тока на отключённые ЛЭП // Сборник докладов восьмой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. – С-Петербург, 2004. – С. 99-103.

6. Ефимов Б.В., Якубович М.В. Анализ максимальных наведённых напряжений на всех высоковольтных линиях энергосистемы // Сборник докладов девятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2006», Санкт-Петербург, 20 – 22 сентября 2006 г. – СПб, ВИТУ. – 2006. – С. 150-154.