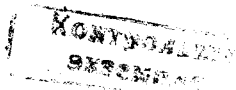


05.26.01
X985



На правах рукописи

Хусайнова Назия Абдрахмановна

**Определение параметров изоляции относительно земли
в распределительных сетях 6...35 кВ с изолированной нейтралью
и источниками компенсации реактивной мощности
на основе измерения режимных параметров**

Специальность 05.26.01 – "Охрана труда (электроэнергетика)"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

re

Челябинск
2001

Работа выполнена на кафедре "Безопасность жизнедеятельности"
Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Сидоров А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кузнецов К.Б.;
кандидат технических наук, доцент
Ильин Ю.П.


Ведущее предприятие – Городские электрические сети
ОАО "Челябэнерго".

Защита диссертации состоится " 26 " апреля 2001 г., в 14.00,
на заседании диссертационного совета Д 212. 298. 05 Южно-Уральского госу-
дарственного университета по адресу: 454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина,
76, ауд. 380.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ

Автореферат разослан " _____ " _____ 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



Ю.С. Усынин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Состояние изоляции электроустановок является одним из основных факторов, определяющих безопасность эксплуатации и бесперебойности электроснабжения потребителей электрической энергии.

Анализ несчастных случаев показывает, что основное количество электротравм при эксплуатации электроприемников напряжением выше 1000 В в сетях с изолированной нейтралью обусловлено прикосновением к токопроводящим металлическим частям электрооборудования, оказавшимся под напряжением вследствие ухудшения состояния изоляции или ее повреждения.

Большинство известных методов определения параметров изоляции требует подключения к таким сетям дополнительного высоковольтного оборудования, которое влияет на режим работы сетей и отрицательно сказывается на надежности и безопасности электроснабжения. Целесообразно для определения параметров изоляции по отношению к земле использовать методы, которые не вносят никаких изменений в режим сети. В этой связи актуальной является задача развития направления определения параметров изоляции по отношению к земле на основе измерения параметров режима сети и разработка эффективных методов, реализующих данное направление.

Актуальной является также задача определения места локального снижения уровня изоляции в электрической распределительной сети без отключения линии и потребителей электроэнергии, что позволило бы своевременно и с минимальными затратами устранять дефекты изоляции, предотвращая возникновение электроопасных ситуаций.

Цель работы. Повышение уровня электробезопасности при эксплуатации электрических распределительных сетей и надежности электроснабжения потребителей путем дальнейшего развития и внедрения в практику метода определения состояния изоляции на основе измерения режимных параметров для прогноза аварийных ситуаций и, соответственно, в ряде случаев предотвращения аварий, а также обнаружения места локального снижения уровня изоляции.

Идея работы. Установление взаимосвязи между параметрами изоляции относительно земли и параметрами режима электрической распределительной сети напряжением 6...35 кВ с учетом влияния устройств компенсации реактивной мощности, несимметрии напряжений и токов, типа используемой при анализе схемы замещения линии электропередачи.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Для определения параметров изоляции сети относительно земли достаточно в любом случае (при наличии устройств компенсации реактивной мощности, несимметрии напряжений и токов в сети) знать напряжения и токи на входе и выходе анализируемого участка сети и углы сдвига между напряжениями и токами фаз.

2. При определении параметров изоляции по параметрам режима электрической распределительной сети минимальные погрешности дают формулы.

использующие П-образную схему замещения и учитывающие токи через поперечные проводимости, как на входе, так и на выходе схемы.

3. Знание напряжений и токов на входе и выходе участка сети, а также углов сдвига между ними обеспечивает определение места локального снижения уровня изоляции линии с погрешностью менее 15% при проводимости изоляции в месте снижения более 10^{-3} См.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ теории электрических цепей, теории вероятности и удивительным совпадением результатов теоретических исследований и численных экспериментов при цифровом моделировании с результатами измерений в реальной электрической сети.

Значение работы. Научное значение работы состоит в том, что сформулированы основные теоретические принципы получения формул для определения параметров изоляции сети относительно земли по результатам измерения параметров режима. На основе предложенных принципов получены 5 групп формул для определения параметров изоляции, выполнен на основе численных экспериментов анализ предложенных формул и определена оптимальная группа формул, дающая возможность определять параметры изоляции по отношению к земле с минимальными погрешностями. Доказано, что предложенные принципы определения параметров изоляции позволяют определить место локального снижения уровня изоляции.

Практическое значение работы заключается в разработке метода определения параметров изоляции и места локального снижения ее уровня без установки дополнительного высоковольтного оборудования и внесения изменений в режим работы сети. Внедрение разработанного метода определения сопротивления изоляции и обнаружения места его локального снижения позволит значительно сократить время и материальные затраты на поиск мест снижения уровня изоляции, повысить надежность и безопасность эксплуатации сетей с изолированной нейтралью.

Реализация выводов и результатов работы. Научные положения, выводы и рекомендации использованы:

1) Центральными электрическими сетями ОАО "Челябэнерго" – методика определения параметров изоляции сети относительно земли и методика определения места снижения уровня изоляции воздушных и кабельных линий электропередачи в распределительных сетях 6...35 кВ;

2) АО "Станкомаш" – методика определения параметров изоляции сети относительно земли в распределительных сетях 6 – 10 кВ;

3) Южно-Уральским государственным университетом при подготовке специалистов энергетических специальностей (курс "Безопасность жизнедеятельности") и специалистов по "Безопасности жизнедеятельности" (курс "Основы электробезопасности) – методика определения параметров изоляции относительно земли и методика определения места снижения уровня изоляции

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены на конференции "Безопасность XXI века" (Санкт-Петербург, 2000), научно-технической конференции Уральского государственного университета путей сообщения "Фундаментальные и прикладные исследования – Транспорт 2000" (Екатеринбург, 2000), XXXIX научно-технической конференции Челябинского государственного агроинженерного университета (Челябинск, 2000), Первой Всероссийской научно-практической конференции "Безопасность жизнедеятельности на пороге третьего тысячелетия" (Челябинск, 2000), региональной Всероссийской научно-практической конференции "Проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии Зауралья" (Курган, 2000), а также на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 1998...2000 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 138 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 12 таблиц, список использованной литературы из 118 наименований и приложения на 45 страницах.

Основное содержание работы

Проблеме определения параметров изоляции линий электропередачи 6...35 кВ распределительных сетей с изолированной нейтралью посвящены исследования Ю.Г. Бацезева, Н.А. Бендяка, В.Ф. Бухтоярова, Л.В. Гладиллина, О.А. Петрова, А.И. Сидорова, Е.Ф. Цапенко, А.Н. Шаткина, В.И. Щуцкого и др. Предложены различные методы определения состояния изоляции, которые предполагают разную степень вмешательства в рабочий режим сети, вплоть до ее полного отключения.

Многие методы определения параметров изоляции по отношению к земле требуют подключения дополнительных источников постоянного или переменного напряжения, токи которых накладываются на рабочий режим. Другие методы требуют подключения дополнительных элементов, присоединяемых между фазой и землей или между нейтралью и землей. Подключение дополнительных элементов также накладывает на рабочий режим дополнительные токи, что способствует снижению уровня электробезопасности.

Среди всех способов определения параметров изоляции заслуживает внимания способ, основанный на измерении режимных параметров в электрических распределительных сетях 6...35 кВ. Этот метод позволяет определить активную и реактивную проводимости изоляции по отношению к земле для участка сети с изолированной нейтралью без установки дополнительного оборудования и внесения изменений в режим работы сети.

В данной работе ставится задача дальнейшего развития вышеуказанного метода по следующим направлениям:

1) установление влияния источников компенсации реактивной мощности в распределительных сетях, несимметрии напряжений и токов на взаимосвязь режимных параметров сети с параметрами изоляции;

2) влияние схем замещения и типа расчётных формул на погрешность определения параметров изоляции;

3) обоснование выбора расчётных формул для определения параметров изоляции;

4) определение места локального снижения уровня изоляции.

В работе рассмотрено определение расчетных параметров режима, необходимых для определения параметров изоляции с учетом несимметрии сети и наличия в ней компенсирующих устройств. Для расчета использована схема, содержащая трехфазную П-образную схему замещения линии электропередачи (рис. 1).

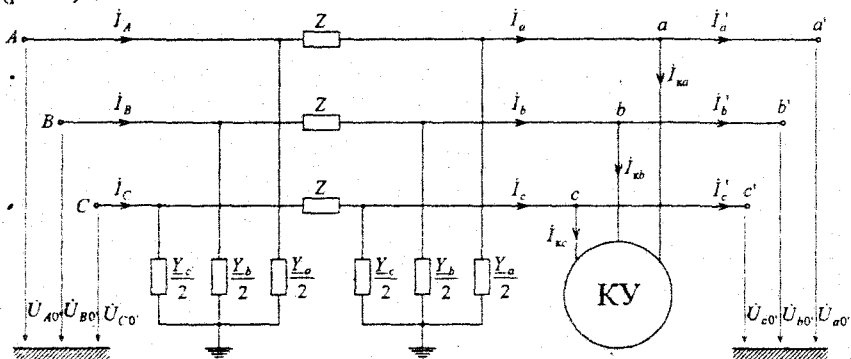


Рис. 1. Трехфазная П-образная схема замещения

На рис. 1 приняты обозначения:

I_A, I_B, I_C – токи в начале линии, А; I_a, I_b, I_c – токи в конце линии, А;

Z – продольное комплексное сопротивление линии, Ом;

Y_a, Y_b, Y_c – комплексные проводимости изоляции фаз a, b , и c , См;

I_{ka}, I_{kb}, I_{kc} – токи компенсирующего устройства, А;

I_a', I_b', I_c' – токи в нагрузках потребителей, А;

$U_{A0'}, U_{B0'}, U_{C0'}$ – напряжения на входе линии по отношению к земле, В;

$U_{A0''}, U_{B0''}, U_{C0''}$ – напряжения на выходе линии по отношению к земле, В.

Дано обоснование возможности расчета для одной фазы сети (рис. 2).

Исходными для расчета являются измеренные параметры режима, в состав которых входят следующие величины: линейные напряжения на выходе (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}); фазное напряжение фазы A на входе ($U_{A0'}$) и фазные напряжения на выходе ($U_{A0''}, U_{B0''}, U_{C0''}$); ток фазы A на входе (I_A) и в нагрузке (I_a'), а

также углы сдвига φ_1' (между напряжением $U_{A0'}$ и током I_A) и φ_2' (между напряжением $U_{a0'}$ и током I_a). В качестве компенсирующих устройств рассмотрено использование конденсаторных батарей и синхронных двигателей.

По рассчитанным параметрам режима могут быть определены комплексные проводимости изоляции. При этом возможны три варианта определения проводимостей при использовании П-образной схемы замещения (рис. 2):

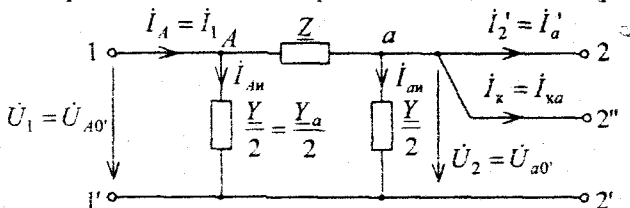


Рис. 2. Расчётная схема замещения фазы А

1) по концу линии (точка а)

$$\frac{Y}{2} = \frac{I_{аи}}{U_{a0'}} = \frac{I_1 - I_2}{U_2}; \quad (1)$$

2) по началу линии (точка А)

$$\frac{Y}{2} = \frac{I_{Аи}}{U_{A0'}} = \frac{I_1 - I}{U_1}; \quad (2)$$

3) общая формула, полученная из уравнения для сечения, охватывающего узлы а и А,

$$I_1 - I_2 = I_{Аи} + I_{аи} = \frac{Y}{2} U_1 + \frac{Y}{2} U_2,$$

откуда

$$\frac{Y}{2} = \frac{I_1 - I_2}{U_1 + U_2}. \quad (3)$$

После подстановки полученных выражений для расчетных параметров режима в приведенные формулы (1...3) получаем расчетные формулы определения параметров изоляции. В частности, для общей формулы они имеют вид:

$$G_{и} = \frac{a}{c}, \quad (4)$$

$$B_{к} = \frac{b}{c}, \quad (5)$$

где

$$a = U_1 [I_1 \cos \varphi_1' - I_2' \cos(\varphi_2' + \psi) - I_x \cos(\psi_x + \psi)] + U_2 [I_1 \cos(\psi - \varphi_1') - I_2' \cos \varphi_2' - I_x \cos \psi_x], \quad (6)$$

$$b = U_1 [-I_1 \sin \varphi_1' + I_2' \sin(\varphi_2' + \psi) - I_x \cos(\psi_x - \psi)] + U_2 [I_1 \sin(\psi - \varphi_1') + I_2' \cos \varphi_2' - I_x \cos \psi_x], \quad (7)$$

$$c = U_1^2 + 2U_1 U_2 \cos \psi + U_2^2. \quad (8)$$

Аналогичный анализ проведен для схемы замещения участка сети, в которой линия представлена Т-образной схемой замещения. Расчетная схема для одной фазы представлена на рис. 3.

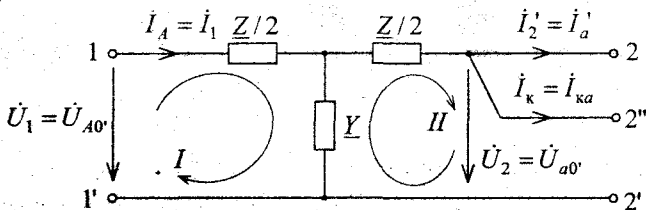


Рис. 3. Расчетная схема замещения для фазы А

На основе анализа этой схемы предложены два варианта формул определения комплексного сопротивления изоляции по отношению к земле:

$$\frac{1}{Y} = Z_n = \frac{U_2 + \frac{Z}{2} I_2}{I_1 - I_2}; \quad (9)$$

$$\frac{1}{Y} = Z_n = \frac{U_1 - \frac{Z}{2} I_1}{I_1 - I_2}. \quad (10)$$

Расчетные формулы, в которых сопротивления выражены через измеряемые параметры режима получаются более сложными, чем формулы (4) – (8) и приводятся только для формулы (10).

$$Z_n = \frac{a + jb}{c}, \quad (11)$$

где

$$a = I_1 U_1 \cos \varphi_1' - \frac{Z}{2} I_1^2 \cos \varphi - U_1 \left[I_2' \cos(\psi + \varphi_2') + I_\kappa \cos(\psi - \psi_\kappa) \right] + \\ + \frac{Z}{2} I_1 \left[I_2' \cos(\psi + \varphi - \varphi_1' + \varphi_2') + I_\kappa \cos(\psi + \varphi - \varphi_1' - \psi_\kappa) \right], \quad (12)$$

$$b = I_1 U_1 \sin \varphi_1' - \frac{Z}{2} I_1^2 \sin \varphi - U_1 \left[I_2' \sin(\psi + \varphi_2') + I_\kappa \sin(\psi - \psi_\kappa) \right] + \\ + \frac{Z}{2} I_1 \left[I_2' \sin(\psi + \varphi - \varphi_1' + \varphi_2') + I_\kappa \sin(\psi + \varphi - \varphi_1' - \psi_\kappa) \right], \quad (13)$$

$$c = I_1^2 + I_2'^2 + I_\kappa^2 - 2I_1 I_2' \cos(\psi - \varphi_1' + \varphi_2') - 2I_1 I_\kappa \cos(\psi - \varphi_1' - \psi_\kappa) + \\ + 2I_2' I_\kappa \cos(\varphi_2' + \psi_\kappa). \quad (14)$$

Активное и реактивное сопротивления изоляции определяются по формулам:

$$R_n = \frac{a}{c}, \quad X_n = \frac{b}{c}.$$

Выявление различных возможных подходов к получению расчетных формул определения параметров изоляции по отношению к земле связано с тем, что рассматриваемый метод чувствителен к погрешностям измерений и погрешностям расчетов. Это связано с тем, что все формулы содержат разность близких по величине токов ($I - I_2$ в формуле (1), $I_1 - I$ в формуле (2), $I_1 - I_2$ в формулах (3), (9) и (10)). Поэтому важно было проанализировать погрешности этих формул и выявить оптимальные формулы, дающие минимальные погрешности, что и выполнено в данной работе.

В диссертации доказана возможность определения места локального снижения уровня изоляции по отношению к земле линии электропередачи в сетях с изолированной нейтралью на основе измерения режимных параметров. При определении места снижения линия длиной l рассматривалась как соединение двух отрезков линии длиной l_1 и $l - l_1$ с проводимостью Y_p в месте стыка частей поврежденной фазы. Соответственно схема замещения принимает вид, показанный на рис. 4, где участки линии заменены П-образными схемами замещения.

В этой схеме продольное сопротивление линии Z разделяется на две части: $k_1 Z$ и $k_2 Z$, где $k_1 = l_1 / l$, а $k_2 = 1 - k_1$. Аналогично разделяется проводимость изоляции Y_n по отношению к земле. Проводимость изоляции определяется по измерениям токов и напряжений неповрежденных фаз.

В результате анализа схемы на рис. 4 получены формулы для k_1 и сосредоточенной проводимости Y_p в месте снижения уровня изоляции.

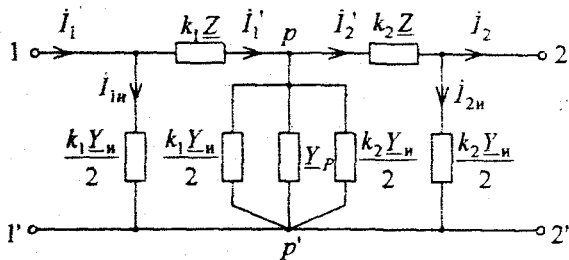


Рис. 4. Схема замещения линии с локальным снижением уровня изоляции

$$k_1 = -p \pm \sqrt{p^2 - q^2}. \quad (15)$$

В формуле (15)

$$p = \frac{Y_n U_2 - I_1 + I_2}{Y_n (U_1 - U_2)}; \quad (16)$$

$$q = \frac{2}{Z Y_n} - \frac{2I_2 + Y_n U_2}{Y_n (U_1 - U_2)}. \quad (17)$$

Проводимость в месте снижения уровня изоляции

$$Y_p = Y_s - \frac{Y_n}{2} - \frac{1}{k_1 k_2 Z}, \quad (18)$$

где

$$Y_s = \frac{\frac{U_1}{k_1} + \frac{U_2}{k_2}}{Z^2 \left[\left(\frac{k_1^2 Y_n}{2} + \frac{1}{Z} \right) U_1 - k_1 I_1 \right]}. \quad (19)$$

Расстояние от начала линии до места снижения уровня изоляции $l_1 = k_1 l$.

Для исследования эффективности предложенных расчетных формул определения параметров изоляции по отношению к земле и выбора оптимальных формул, которые рекомендуется использовать на практике, была применена цифровая модель анализируемого участка сети. С помощью этой модели выполнялись численные эксперименты.

Цель численных экспериментов:

1) исследовать влияние различных факторов (наличие компенсирующего устройства, сопротивление нагрузки, сопротивление линии) на точность определения параметров изоляции;

2) выбрать из предложенных выше формул те, которые дают минимальные погрешности;

3) определить в зависимости от параметров сети уровень проводимости изоляции (минимальная проводимость), ниже которого формулы не дадут достоверного результата.

Численный эксперимент состоит из двух частей:

1. Цифровое моделирование участка электрической сети (см. рис. 1), в результате которого определяют режимные параметры, на основании измерений которых по разработанным формулам рассчитываются параметры изоляции (режимные параметры рассчитываются с высокой точностью на цифровой модели и рассматриваются как действительные значения параметров).

2. Вероятностное моделирование процесса измерений с учетом свойств и особенностей измерительных приборов. На этом этапе по рассчитываемым значениям режимных параметров определяют "измеренные" значения напряжений и токов приборами заданного класса точности (т.е. моделируют погрешности измерений).

Полученные "измеренные" значения режимных параметров используются для определения параметров изоляции по разработанным формулам. Найденные значения параметров изоляции сопоставляются с заданными в численном эксперименте и в результате находят погрешности определения параметров изоляции.

При цифровом моделировании считаются заданными следующие величины:

1) линейные напряжения U_{ab} , U_{ca} , U_{bc} в конце линии;

2) сопротивления фаз Z_a , Z_b , Z_c нагрузки (с несимметрией в пределах 5%) и угол сдвига φ_2 между напряжениями и токами на сопротивлениях нагрузки (считаем одинаковыми для всех фаз);

3) ёмкостная проводимость фазы конденсаторной батареи B_c (для соединения в треугольник);

4) сопротивления фаз линии $Z = R + jX$ и проводимости изоляции G_{no} , G_{nb} , G_{nc} , B_{no} , B_{nb} , B_{nc} для всех фаз.

Методика расчетов при цифровом моделировании участка сети основана на последовательном определении напряжений и токов на участках цепи, начиная от нагрузки и постепенно продвигаясь к началу линии электропередачи.

Сначала по заданным действующим значениям линейных напряжений на нагрузке определяют комплексные значения. Дальнейшие вычисления ведутся в комплексной форме. Токи в нагрузке определяют по полученным линейным

напряжениям. Аналогичным образом определяют токи компенсирующего устройства.

Для определения токов в изоляции по линейным напряжениям при использовании П-образной схемы замещения (см. рис. 1 и 2) сначала треугольник, образованный продольным сопротивлением линии Z и ветвями с проводимостями изоляции $Y_{\text{н}}/2$ преобразуют в эквивалентную звезду (в Т-образную схему). Такое преобразование выполняется для каждой фазы. Для случая Т-образной схемы замещения (рис. 3) такое преобразование не выполняется.

После этого делают преобразование звезды, образованной проводимостями изоляции трех фаз Y_a, Y_b, Y_c в эквивалентный треугольник. Напряжения на сторонах треугольника определяются по законам Кирхгофа и найденным токам в конце линии. Затем определяются токи в сторонах треугольника и токи в начале линии, а по ним напряжения в начале линии.

Как отмечено выше цифровая модель предназначена для определения измеряемых параметров режима. Полученные значения рассматриваются как действительные значения измеряемых величин при моделировании измерений.

Моделирование измерений со случайными погрешностями осуществляется с использованием вероятностной функции $rbeta(m, b1, b2)$, имеющейся в наборе функций пакета *Mathcad 7 Pro*, который использован при численном моделировании. Эта функция дает вектор размерности m случайных значений в диапазоне $[0, 1]$. Для преобразования этого диапазона в диапазон, характерный для реальных измерительных приборов $[-kp, kp]$ (kp определяется как класс точности прибора, деленный на сто), использована функция

$$V = 2 \cdot rbeta(m, b1, b2) - 1, \quad (20)$$

которая домножается на kp .

Координаты полученного вектора соответствуют отдельным измерительным приборам используемого комплекта.

Полученные "измеренные" значения параметров режима используются для расчета параметров изоляции. Найденные параметры изоляции сопоставляются с "действительными", которые считались заданными при цифровом моделировании.

Когда определяются параметры изоляции по отношению к земле реальной сети, нам не известны действительные значения параметров изоляции, то есть не с чем сопоставить полученные расчетные значения параметров изоляции. Именно поэтому в диссертации оценка предлагаемых расчетных формул осуществляется на основе численных экспериментов. Тем не менее, для практических целей важно иметь простой критерий, по которому можно судить о достоверности результатов, полученных по этим формулам.

В качестве критерия достоверности предложено использовать понятие минимальной проводимости изоляции y_{min} , при которой полученные по фор-

муде результаты еще можно считать достоверными. Формулы для y_{\min} получены на основе аналитического анализа погрешностей формул (1) – (3) и (9), (10).

Минимальное значение y_{\min} получается для формулы (3). Для нее

$$y_{\min} = \frac{2k_p I_1}{U_1}.$$

Соответственно расчетные формулы, полученные на основе формулы (3) (общей формулы), являются оптимальными, рекомендуемыми для практического использования. Это подтверждают результаты численных экспериментов.

Некоторые результаты численных экспериментов приведены в таблице. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Формулы по началу и по концу линии дают достоверные результаты, позволяющие определить, главным образом, порядок величины проводимости изоляции, если проводимость изоляции $2 \cdot 10^{-4}$ См (на порядок больше y_{\min} – режим 3). При проводимости порядка $2 \cdot 10^{-3}$ См погрешность меньше 15% (режим 4).

2. Общая формула позволяет получить достоверные значения и для проводимости $2 \cdot 10^{-5}$ См (порядок y_{\min} – режим 1), но с большой погрешностью (максимум до 100%).

3. При увеличении активной проводимости одной фазы до $5 \cdot 10^{-5}$ См (режим 2) погрешность определения активной проводимости снижается до 64%. При измерениях в неповрежденной фазе погрешность измерения реактивной проводимости оказывается несколько выше.

4. В случае проводимости изоляции (активной и реактивной) равной $20 \cdot 10^{-5}$ См погрешности не превышают 15% (режим 3).

5. Погрешности несущественно зависят от компенсирующего устройства и несколько увеличиваются при увеличении его мощности.

6. В режиме 4 при проводимостях, равных $2 \cdot 10^{-3}$ См (на два порядка выше y_{\min}) погрешности определения проводимостей определяются главным образом не погрешностями метода, а погрешностями расчетов.

Исследовано влияние нагрузки на погрешности. При изменении нагрузки от 50 до 120 Ом погрешности уменьшаются примерно в 1,5 раза. Это изменение объясняется увеличением разностей токов I и I_2 , I_1 и I_2 , I_1 и I .

Исследовано также влияние продольного сопротивления линии на величину погрешностей. С увеличением продольного сопротивления линии погрешности уменьшаются, но несущественно, что можно объяснить тем, что это сопротивление незначительно влияет на токи в линии по сравнению с сопротивлением нагрузки.

Таблица
 Результаты численных экспериментов по 1000 измерениям при $k_p = 0,1\%$ и распределении плотности вероятности по закону, близкому к нормальному

№	Параметры	1-й режим			2-й режим			3-й режим			4-й режим		
		по началу	по концу	общая	по началу	по концу	общая	по началу	по концу	общая	по началу	по концу	общая
1	$G_n, \text{max}, 10^{-5}$ См	28,55	23,85	3,604	32,6	26,77	7,32	48,2	41,8	22,63	226,8	222	202
2	$G_n, \text{min}, 10^{-5}$ См	-22,33	-18,7	-0,215	-20,14	-15,4	1,814	-6,45	0,392	17,03	175,5	179	198
3	$B_n, \text{max}, 10^{-3}$ См	12,075	12,37	2,902	12,67	11,63	3,56	31,9	29,56	22,16	210,1	210	201
4	$B_n, \text{min}, 10^{-3}$ См	-8,55	-8,41	1,018	-9,63	-8,14	0,422	7,82	10,46	17,6	189,6	189	199
5	$G_n, \text{max}, \text{п.}\%$	1327	1093	80,2	552	435	46,3	140,8	109,2	13,14	13,4	10,97	0,835
6	$G_n, \text{min}, \text{п.}\%$	-1217	-1035	-110,7	-503	-409	-63,7	-132,3	-98	-14,85	-12,24	-10,3	-1,20
7	$B_n, \text{max}, \text{п.}\%$	504	529	45,1	533	481	77,8	59,4	47,8	10,79	5,03	5,35	0,443
8	$B_n, \text{min}, \text{п.}\%$	-528	-520	-49,1	-581	-507	-78,9	-60,9	-47,7	-11,99	-5,19	-5,26	-0,47
9	$U_{\text{min}}, 10^{-5}$ См	2,298			2,303			4,51			2,71		
10	G повр. фазы	2 в фазе α			5 в фазе α			20			200		
11	B, G здор. фаз	2			2			20			200		
12	B_k, G_0, C_M	0,00237 / -			0,00237 / -			0,00237 / 0,005			0,00237 / -		

При проводимости изоляции порядка u_{\min} требуются приборы класса точности 0,1. При более высоком уровне проводимости изоляции могут использоваться приборы класса 0,5.

С помощью численных экспериментов проведены также исследования по определению места локального снижения уровня изоляции. Результаты показывают, что с достаточной для практики степенью точности (менее 10%) можно определить место снижения уровня изоляции с использованием приборов класса точности 0,5 при проводимости в месте снижения порядка 10^{-3} См.

Измерения в реальных сетях подтвердили результаты численных экспериментов.

Заключение

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научно-технической задачи определения параметров изоляции в распределительных электрических сетях, позволяющее предотвращать появление электроопасных ситуаций, повышающее безопасность и надежность электроснабжения.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных в диссертационной работе, сводятся к следующему.

1. Сформулированы основные теоретические принципы получения формул для определения параметров изоляции сети относительно земли по результатам измерения параметров режима и проведено исследование этих формул с целью выбора формул, дающих минимальные погрешности.

2. Показано, что в зависимости от выбора схемы замещения линии электропередачи и выбора опорной точки, относительно которой записываются уравнения для определения параметров изоляции, можно различать 5 основных групп формул определения параметров изоляции по параметрам режима (три для П-образной схемы замещения и две для Т-образной).

3. Предложенные группы формул определения параметров изоляции по отношению к земле впервые позволяют учитывать влияние компенсирующих устройств (конденсаторных батарей и синхронных двигателей) на параметры режима.

4. На основе анализа режимных параметров предложен метод определения места локального снижения уровня изоляции по отношению к земле с погрешностью менее 15% при проводимости изоляции в месте снижения уровня изоляции более 10^{-3} См.

5. Проведено аналитическое исследование применимости предложенных формул, которое показало, что минимальные погрешности дают формулы, использующие П-образную схему замещения и учитывающие токи че-

рез поперечные проводимости как на входе, так и на выходе схемы ("общая" формула).

6. Разработана цифровая модель участка сети и методика проведения с ее помощью численных экспериментов, которые позволили:

1) исследовать предложенные формулы определения параметров изоляции по отношению к земле, определить области их применимости и выявить оптимальную группу расчетных формул определения параметров изоляции по отношению к земле;

2) определять действительные значения измеряемых параметров режима и моделировать процесс измерения приборами заданного класса точности.

Результаты численных экспериментов показали, что область применимости тех или иных групп формул зависит, главным образом, от уровня проводимости изоляции.

8. Аналитические исследования, численное моделирование, эксперименты в реальной сети позволяют утверждать, что полученные в работе формулы дают реальную возможность построения системы селективного контроля состояния изоляции с определением как параметров изоляции, так и места их существенного снижения, обеспечивая при этом условия для отключения поврежденного участка до возникновения однофазного замыкания на землю.

9. Предложенный метод определения параметров изоляции сети относительно земли и метод определения места локального снижения уровня изоляции воздушных и кабельных линий электропередачи в распределительных сетях 6...35 кВ использованы Центральными электрическими сетями ОАО "Челябэнерго", в распределительных сетях АО "Станкомаш", а также Южно-Уральским государственным университетом при подготовке специалистов электротехнических специальностей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Хусаинова Н.А., Лапченков К.В., Сидоров А.И. Контроль изоляции в сетях 6...10 кВ при наличии в сети статических устройств компенсации реактивной мощности // *Электробезопасность*. – 1998. – № 2. – С. 17 – 21.

2. Хусаинова Н.А. Исследование и выбор оптимального метода контроля состояния изоляции по режимным параметрам в электрических распределительных сетях 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью // *Электробезопасность*. – 1998. – № 3–4. – С. 5 – 11.

3. Хусаинова Н.А., Сидоров А.И., Шестаков А.Л. Определение локального места повреждения изоляции линии электропередачи 6–10 кВ по результатам измерения параметров режима // *Электробезопасность*. – 1998. – № 3 – 4. – С. 18 – 24.

4. Хусаинова Н.А. Исследование возможностей формул определения сопротивления изоляции относительно земли сетей 6...10 кВ по параметрам режи-

ма с помощью численных экспериментов // Электробезопасность. – 1999. – № 1. – С. 5 – 12.

5. Сидоров А.И., Хусаинова Н.А., Шестаков А.Л. Определение сопротивления изоляции по отношению к земле сетей с изолированной нейтралью напряжением 6...35 кВ по режимным параметрам // Электронный журнал "Известия ЧНЦ УрО РАН". – № 1. – 2000. – С. 60 – 63.

6. Хусаинова Н.А., Сидоров А.И., Шестаков А.Л. Эффективный непрерывный контроль состояния изоляции в электрических распределительных сетях – один из путей повышения безопасности и надежности электроснабжения // Безопасность XXI века: Тез. докл. – Санкт-Петербург: МАНЭБ, 2000. – С. 31 – 32.

7. Хусаинова Н.А., Сидоров А.И. Определение локального места повреждения изоляции линии электропередачи в распределительных сетях по результатам измерения параметров режима // Фундаментальные и прикладные исследования – Транспорт – 2000: Труды всероссийской. научно техн. конф. – Екатеринбург: УрГУПС, 2000. – Ч.2. – С. 242.

8. Хусаинова Н.А., Сидоров А.И. Исследование метода определения параметров изоляции в сетях 6 – 35 кВ по режимным параметрам с помощью численных экспериментов //Безопасность жизнедеятельности на пороге третьего тысячелетия: Сб. материалов Первой Всероссийской научно-практ. конф. – Челябинск: ЮУрГУ, 2000. – С. 25 – 26.

9. Сидоров А.И., Хусаинова Н.А. Профилактика электротравматизма в распределительных сетях с изолированной нейтралью путем создания в них системы управления состоянием изоляции //Проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии Зауралья: Материалы региональной научно-практ. конф. – Курган: КГУ, 2000. – С. 59 – 60.