

*На правах рукописи*

**Нараева Рузалия Раисовна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ И МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ  
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6...35 кВ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» на кафедре «Электротехника».

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор **Хусаинов Ш.Н.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**В.Ф. Бухтояров;**  
кандидат технических наук  
**В.В. Кацай.**

Ведущее предприятие – ГОУ ВПО «Уральский государственный  
технический университет» (УГТУ-УПИ),  
г. Екатеринбург.

Защита состоится 26 марта 2009 г., в 10 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 20 февраля 2009 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 267-98-94, e-mail: [nar.ru@mail.ru](mailto:nar.ru@mail.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одним из основных факторов, определяющих безопасность распределительных электрических сетей 6...35 кВ, является состояние изоляции данных сетей.

Ухудшение состояния изоляции приводит к возрастанию токов утечки, в результате которых может возникнуть короткое замыкание на землю через поврежденный изолятор, приводящее к электроопасной ситуации в распределительных сетях. Персонал, обслуживающий данные сети, в случае аварии может быть подвержен негативному влиянию токов утечки на землю. Поэтому необходим непрерывный контроль изоляции сети, позволяющий предотвращать электроопасные ситуации в случае ухудшения изоляции.

К настоящему времени разработаны методы определения параметров изоляции. Однако каждый из них имеет определенные недостатки. Известны методы, требующие установки дополнительного высоковольтного оборудования либо применения оперативного тока, что приводит к изменениям рабочего режима работы сети и отражается на безопасности и надежности электроснабжения. Ряд известных методов лишь фиксирует снижение сопротивления изоляции, не определяя при этом саму его величину. Существуют методы, основанные на измерении режимных параметров сети, которые не вносят изменения в рабочий режим работы сети, но требуют дальнейшего развития в связи с тем, что не обеспечивают необходимой точности расчетов. Актуальной задачей на сегодняшний день является обеспечение непрерывного контроля изоляции, которое возможно осуществить на основе дальнейшего развития и исследования данных методов, основанных на измерении режимных параметров сети.

Дальнейшее развитие методов определения параметров изоляции предполагает в будущем реализовать непрерывный контроль изоляции в виде диагностики на основе измерения режимных параметров сети в реальном времени. Данная диагностика позволит на ранней стадии обнаружить ухудшение изоляции и определить ее участок, и своевременно устранить дефекты изоляции, без отключения потребителей электроэнергии, тем самым предотвратить аварийные ситуации в распределительных сетях.

**Цель работы** – повышение безопасности распределительных сетей 6...35 кВ с изолированной нейтралью за счет дальнейшего развития и внедрения на практике методов определения проводимости изоляции и места ее повреждения по режимным параметрам сети.

**Идея работы** – разработка оптимальных методов определения параметров изоляции и места ее повреждения на основе измерения режимных параметров сети и исследование эффективности этих методов с использованием цифровой модели сети.

### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту.**

1. Погрешности определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли зависят от выбора схемы замещения линии с отпайкой;

2. Аналитические зависимости проводимостей изоляции и режимных параметров сети, полученные в данной работе по методу узловых потенциалов (МУП) и методу контурных токов (МКТ) дают различные погрешности определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли. Использование дополнительно измеренных токов в месте присоединения отпайки, в упомянутых уравнениях уменьшает погрешности определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли;

3. Точность определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли и возможность определения участка с ухудшенной изоляцией зависят от степени ухудшения изоляции в месте повреждения и класса точности измерительных приборов;

4. Возможность непрерывного контроля изоляции на основе измерения режимных параметров сети.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечивается строгим соблюдением законов теоретических основ электротехники и сопоставлением результатов расчетов проводимости изоляции – с действительными значениями проводимости изоляции, заложенными в цифровой модели сети. Было также проведено сопоставление результатов определения реактивной проводимости изоляции реальной линии, полученной в эксперименте со справочными данными.

**Значение работы.** Научное значение работы состоит в том, что получены аналитические зависимости, которые позволяют определить проводимость изоляции фаз сети относительно земли линии с отпайкой по результатам измерения параметров режима в распределительных электрических сетях 6...35 кВ с изолированной нейтралью. На основе численных экспериментов, по полученным аналитическим зависимостям исследованы и проанализированы результаты расчетов предложенными методами по определению параметров изоляции относительно земли с минимальными погрешностями и доказана возможность определения участка с ухудшенной изоляцией в распределительной сети, имеющей отпайку.

**Практическое значение работы** заключается в разработке эффективной методики определения параметров изоляции фаз сети относительно земли, а также места ее повреждения и возможности реализации непрерывного контроля изоляции на ее основе по результатам измерения режимных параметров сети в реальном времени в виде диагностики с использованием автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии. Практическое внедрение данного метода позволит повысить безопасность работы распределительных электрических сетей.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Методика определения параметров изоляции относительно земли и участка ее повреждения на основе

измерения режимных параметров сети внедрена Центральными электрическими сетями филиала ОАО «МРСК Урала»-«Челябэнерго».

Результаты аналитических зависимостей, научных выводов и рекомендаций по определению проводимости изоляции относительно земли и места снижения сопротивления изоляции линии с отпайкой в распределительных электрических сетях 6...35 кВ с изолированной нейтралью предложены для применения Южно-Уральскому государственному университету для рассмотрения в лекционном курсе «Электрические сети и системы» при обучении студентов специальности 140205 «Электроэнергетические системы и сети», а также бакалавров по направлению 14020062 «Электроэнергетика».

**Апробация работы.** Основные материалы и результаты диссертационной работы были доложены, рассмотрены и одобрены на XXVII и XXVIII Российских школах по проблемам науки и технологий (Миасс, 2007, 2008), на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 2007–2008).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ. Из них 2 – в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 201 страницу машинописного текста, 18 рисунков, 37 таблиц, список литературы из 151 наименования и 4 приложения на 55 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основная идея работы, представлены научные положения и результаты, выносимые на защиту, отмечена научная значимость и практическая ценность работы, представлены сведения об ее апробации и основных публикациях по теме, описана структура диссертации.

Большой вклад в изучение проблемы определения параметров изоляции внесли такие отечественные исследователи, как Бендюк Н.А., Бухтояров В.Ф., Гладилин Л.В., Петров О.А., Сидоров А.И., Цапенко Е.Ф. и др.

Из анализа литературных источников различные методы определения параметров изоляции предполагают разную степень воздействия на рабочий режим сети. В связи с этим различают следующие методы:

- 1) методы определения параметров изоляции, требующие полного отключения электроустановки;
- 2) методы определения параметров изоляции, использующие напряжение постороннего источника питания, токи которых накладываются на рабочий режим сети, что приводит к снижению уровня электробезопасности;
- 3) методы определения параметров изоляции, использующие подключение к электроустановке дополнительных элементов, что также

накладывает дополнительные токи на рабочий режим сети, способствующий снижению уровня электробезопасности;

4) методы определения параметров изоляции на основе измерения режимных параметров сети, без установки дополнительного оборудования и не оказывающие влияния на режим работы электроустановки.

На основе анализа литературных данных, выбрано направление проводимых исследований по дальнейшему развитию методов определения параметров изоляции через параметры режима сети.

В настоящей работе исследованы более эффективные методы определения параметров изоляции с выдвижением гипотез о месте повреждения изоляции. А также исследованы другие факторы, влияющие на определение величины проводимости изоляции и определения участка ее повреждения, такие как: кратность увеличения проводимости изоляции поврежденного участка и класс точности измерительных приборов.

В перечисленных выше исследованиях расчёты ведутся для комплексных проводимостей, а анализ ведется в основном для активных проводимостей, поскольку степень повреждения изоляции определяется активной проводимостью.

Данный метод, основанный на измерении режимных параметров сети, в дальнейшем может быть использован для реализации непрерывного контроля изоляции в режиме реального времени в виде диагностики. Это позволит фиксировать изменение проводимости изоляции и своевременно предотвратить аварийные ситуации, вызванные пробоем изоляции в случае ее – ухудшения.

В данной работе проводятся исследования по влиянию схем замещения линии с отпайкой на погрешности определения проводимости изоляции относительно земли в распределительных электрических сетях 6...35 кВ.

Исследования проводятся для двух вариантов схем замещения: П-образной и Т-образной, с применением в расчетах метода узловых потенциалов (МУП) и метода контурных токов (МКТ).

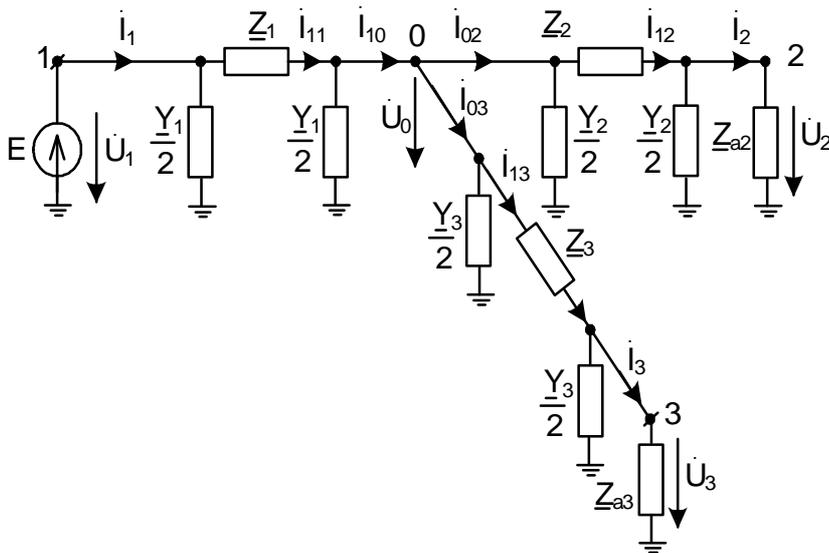
Считается, что заданной является 3-фазная цепь с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой, поэтому расчеты выполняются для одной фазы (фазы А).

Для исследования возможностей предлагаемого метода определения проводимости изоляции и погрешности ее определения по режимным параметрам использованы цифровые модели электрической сети с П-образной и Т-образной схемами замещения, записанные в пакете MatCAD.

Задача цифрового моделирования (ЦМ) состоит в определении режимных параметров сети (или величин), рассчитанных с высокой степенью точности, которые принимаются за действительные значения, на основании измерения которых определяются параметры изоляции.

Расчет ЦМ основан на последовательном определении напряжений и токов на участках цепи, начиная с места присоединения отпайки и постепенно продвигаясь к концам и началу линий.

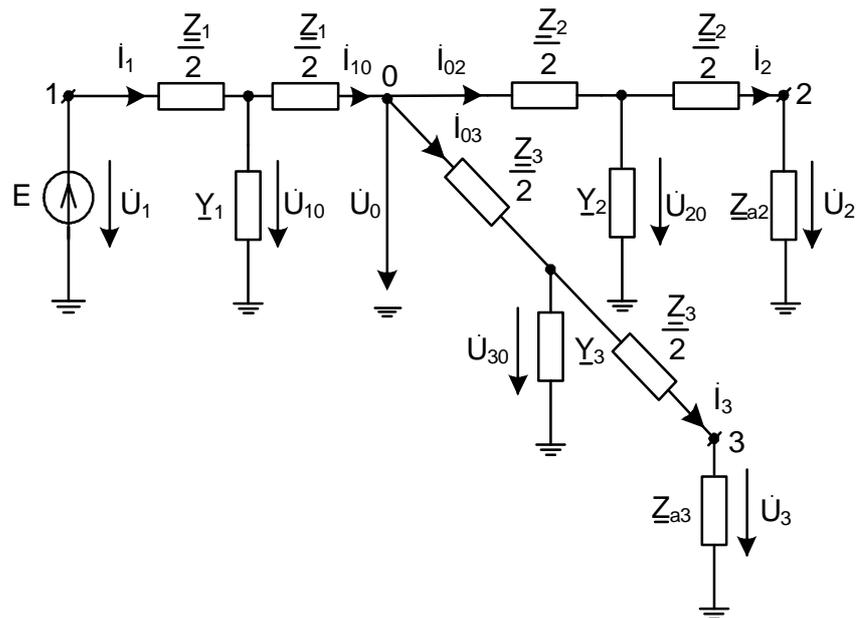
П-образная и Т-образная схемы замещения фазы А участка сети цифровых моделей представлены соответственно на рис. 1 и 2.



Действительные значения измеряемых величин, полученные в цифровых моделях, используются при моделировании измерений напряжений и токов приборами класса 0,1 для 100 циклов измерений, представляющих собой модель одного реального измерения.

Рис. 1. П-образная схема замещения фазы участка сети

Рис. 2. Т-образная схема замещения фазы участка сети



Для П-образной схемы замещения линии с отпайкой при расчете по МУП и МКТ после выполнения всех преобразований, с учетом приведенных в работе обозначений, получены уравнения по МУП:

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) - \underline{K}_1 \cdot \underline{Z}_1 \right] \cdot \left( g + \frac{\underline{Y} + \underline{Y}_3}{2} \right) - U_1 \cdot \frac{1}{\underline{Z}_1} - U_2 \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} \cdot \frac{1}{\underline{Z}_2} - U_3 \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} \cdot \frac{1}{\underline{Z}_3} = 0; \quad (1)$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) - \underline{K}_1 \cdot \underline{Z}_1 \right] \cdot \left( -\frac{1}{\underline{Z}_2} \right) + \left[ U_2 \cdot \left( \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y}}{2} \right) + \underline{K}_2 \right] \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} = 0; \quad (2)$$

$$\left[ U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) - \underline{K}_1 \cdot \underline{Z}_1 \right] \cdot \left( -\frac{1}{\underline{Z}_3} \right) + \left[ U_3 \cdot \left( \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{\underline{Y}_3}{2} \right) + \underline{K}_3 \right] \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} = 0 \quad (3)$$

и уравнения по МКТ:

$$-\mathcal{R}_1 \cdot \frac{2}{m \cdot \underline{Y}} + \left( \mathcal{R}_1 - U_1 \cdot \frac{m \cdot \underline{Y}}{2} \right) \cdot \left( \underline{Z}_1 + \frac{2}{m \cdot \underline{Y}} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} \right) - \left[ \left( U_2 \cdot \frac{(1-m) \cdot \underline{Y}}{2} + \mathcal{R}_2 \right) \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} + \left( U_3 \cdot \frac{\underline{Y}_3}{2} + \mathcal{R}_3 \right) \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} \right] \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} = 0; \quad (4)$$

$$\left[ \left( U_2 \cdot \frac{(1-m) \cdot \underline{Y}}{2} + \mathcal{R}_2 \right) \cdot \left( \underline{Z}_2 + \frac{2}{(1-m) \cdot \underline{Y}} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} \right) - \mathcal{R}_2 \mathcal{R}_2 \cdot \frac{2}{(1-m) \cdot \underline{Y}} \right] \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} + \left[ U_1 \cdot \frac{m \cdot \underline{Y}}{2} - \mathcal{R}_1 + \left( U_3 \cdot \frac{\underline{Y}_3}{2} + \mathcal{R}_3 \right) \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} \right] \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} = 0; \quad (5)$$

$$\left[ U_1 \cdot \frac{m \cdot \underline{Y}}{2} - \mathcal{R}_1 + \left( U_2 \cdot \frac{(1-m) \cdot \underline{Y}}{2} + \mathcal{R}_2 \right) \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} \right] \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} + \left[ \left( U_3 \cdot \frac{\underline{Y}_3}{2} + \mathcal{R}_3 \right) \cdot \left( \underline{Z}_3 + \frac{2}{\underline{Y}_3} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} \right) - \mathcal{R}_3 \cdot \frac{2}{\underline{Y}_3} \right] \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} = 0. \quad (6)$$

Аналогично при расчете Т-образной схемы замещения получены уравнения по МУП:

$$U_1 \cdot \left( \frac{4}{\underline{Z}_1^2 \cdot g_1} - \frac{2}{\underline{Z}_1} - m \cdot \underline{Y} \right) - \mathcal{R}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2} \cdot \left( \frac{4}{\underline{Z}_1^2 \cdot g_1} - \frac{4}{\underline{Z}_1} - m \cdot \underline{Y} \right) + \left( U_2 + \mathcal{R}_2 \cdot \frac{\underline{Z}_2}{2} \right) \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} \cdot \frac{4}{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \cdot g_1} + \left( U_3 + \mathcal{R}_3 \cdot \frac{\underline{Z}_3}{2} \right) \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} \cdot \frac{4}{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 \cdot g_1} = 0; \quad (7)$$

$$\left( U_1 - \mathcal{R}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2} \right) \cdot \frac{4}{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \cdot g_1} + \left[ U_2 \cdot \left( \frac{4}{\underline{Z}_2^2 \cdot g_1} - \frac{2}{\underline{Z}_2} - (1-m) \cdot \underline{Y} \right) + \mathcal{R}_2 \cdot \frac{\underline{Z}_2}{2} \cdot \left( \frac{4}{\underline{Z}_2^2 \cdot g_1} - \frac{4}{\underline{Z}_2} - (1-m) \cdot \underline{Y} \right) \right] \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} + \left( U_3 + \mathcal{R}_3 \cdot \frac{\underline{Z}_3}{2} \right) \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} \cdot \frac{4}{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 \cdot g_1} = 0; \quad (8)$$

$$\left( U_1 - \mathcal{R}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2} \right) \cdot \frac{4}{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 \cdot g_1} + \left( U_2 + \mathcal{R}_2 \cdot \frac{\underline{Z}_2}{2} \right) \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} \cdot \frac{4}{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 \cdot g_1} + \left[ U_3 \cdot \left( \frac{4}{\underline{Z}_3^2 \cdot g_1} - \frac{2}{\underline{Z}_3} - \underline{Y}_3 \right) + \mathcal{R}_3 \cdot \frac{\underline{Z}_3}{2} \cdot \left( \frac{4}{\underline{Z}_3^2 \cdot g_1} - \frac{4}{\underline{Z}_3} - \underline{Y}_3 \right) \right] \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} = 0 \quad (9)$$

и уравнения по МКТ:

$$\mathcal{R}_1 \cdot \frac{1}{m \cdot \underline{Y}} + \left[ U_1 \cdot m \cdot \underline{Y} - \mathcal{R}_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) \right] \cdot \left( \frac{\underline{Z}_1}{2} + \frac{\underline{Z}_3}{2} + \frac{1}{m \cdot \underline{Y}} + \frac{1}{\underline{Y}_3} \right) + \left[ \mathcal{R}_2 \cdot \left( 1 + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_2}{2} \right) + U_2 \cdot (1-m) \cdot \underline{Y} \right] \cdot \left( \frac{\underline{Z}_3}{2} + \frac{1}{\underline{Y}_3} \right) \cdot e^{j \operatorname{Re}(y)} + \mathcal{R}_3 \cdot \frac{1}{\underline{Y}_3} \cdot e^{j \operatorname{Im}(y)} = 0; \quad (10)$$

$$\left[ \mathcal{U}_1 \cdot m \cdot \underline{Y} - \mathcal{R}_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) \right] \cdot \left( \frac{\underline{Z}_3}{2} + \frac{1}{\underline{Y}_3} \right) + \left[ \left[ \mathcal{R}_2 \cdot \left( 1 + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_2}{2} \right) + \right. \right. \quad (11)$$

$$\left. \left. + \mathcal{U}_2 \cdot (1-m) \cdot \underline{Y} \right] \cdot \left( \frac{\underline{Z}_2}{2} + \frac{\underline{Z}_3}{2} + \frac{1}{(1-m) \cdot \underline{Y}} + \frac{1}{\underline{Y}_3} \right) + \mathcal{R}_2 \cdot \frac{1}{(m-1) \cdot \underline{Y}} \right] \cdot e^{j\text{Re}(y)} + \mathcal{R}_3 \cdot \frac{1}{\underline{Y}_3} \cdot e^{j\text{Im}(y)} = 0;$$

$$\left[ \mathcal{U}_1 \cdot m \cdot \underline{Y} - \mathcal{R}_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_1}{2} \right) + \left[ \mathcal{R}_2 \cdot \left( 1 + \frac{(1-m) \cdot \underline{Y} \cdot \underline{Z}_2}{2} \right) + \mathcal{U}_2 \cdot (1-m) \cdot \underline{Y} \right] \cdot e^{j\text{Re}(y)} \right] \cdot \frac{1}{\underline{Y}_3} + \quad (12)$$

$$+ \left[ \mathcal{R}_3 \cdot \left( \frac{\underline{Z}_3}{2} + \frac{1}{\underline{Y}_3} \right) + \mathcal{U}_3 \right] \cdot e^{j\text{Im}(y)} = 0.$$

Обозначения напряжений, токов, сопротивлений и проводимостей в уравнениях соответствуют обозначениям на схеме;

$\underline{m} = \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}}$  – коэффициент распределения проводимости изоляции;  $y = y_2 + jy_3$  –

комплексная переменная;  $\underline{g} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3}$ .

Полученные уравнения решаются методом минимизации среднеквадратичной погрешности в пакете MathCad, в результате чего определяется величина суммарной проводимости изоляции рассматриваемого участка сети и погрешность ее определения.

Анализ проведенных исследований показал, что диапазон изменения величины суммарной проводимости изоляции, и ее погрешности для цепи с П-образной схемой замещения не зависимо от выбора метода расчета (результаты по МУП и МКТ совпадают) получились меньше, чем для Т-образной схемы замещения (табл. 1 и 2).

При расчете погрешности определения суммарной проводимости изоляции в качестве заданной активной проводимости принимается среднее значение активной проводимости изоляции воздушной линии с учетом того, что активная проводимость изоляции линии меняется в зависимости от климатических условий и состояния изоляторов.

Таблица 1  
Погрешности определения суммарной проводимости изоляции

Схема замещения	Метод расчета	Gs max, %	Gs min, %	Bs max, %	Bs min, %
П	МКТ, МУП	33,29	-47,49	49,59	-45,12
Т	МКТ, МУП	27,56	-72,78	75,00	-48,12

Таблица 2  
Определение суммарной проводимости изоляции

Схема замещения	Метод расчета	Gs max, См	Gs min, См	Bs max, См	Bs min, См
П	МКТ, МУП	0,0004799	0,0001890	0,001077	0,0003952
Т	МКТ, МУП	0,0004592	0,00009800	0,001260	0,0003735

В результате исследований установлено, что оптимальным является выбор П-образной схемы замещения линии с отпайкой с применением в расчетах МУП и МКТ.

Используя уравнения цепи, полученные выше для П-образной схемы замещения по МУП и МКТ, выведем аналитические зависимости для более точного определения величины проводимости изоляции относительно земли.

На данном этапе расчетов считается, что в рассматриваемой цепи произошло повреждение изоляции в фазе А, поэтому расчеты проводимостей изоляции выполняются для схемы фазы А и сопоставляются с проводимостями изоляции неповрежденной фазы В. Расчеты выполняются для П-образной схемы замещения линии с отпайкой по МУП для трех случаев ухудшения изоляции:

- 1) на первом участке (1–0) главной линии;
- 2) на втором участке (0–2) главной линии;
- 3) на третьем участке (0–3) отпаечной линии.

В работе использованы результаты расчетов цифровых моделей при исправной симметричной сети и при ухудшении изоляции в фазе А на первом, втором или третьем участках со 100-кратным увеличением активной проводимости изоляции соответственно:

$$\underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{b1} + 100 \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}), \quad \underline{Y}_{a2} = \underline{Y}_{b2} + 100 \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}), \quad \underline{Y}_{a3} = \underline{Y}_{b3} + 100 \operatorname{Re}(\underline{Y}_{sb}).$$

Расчет симметричной цифровой модели приведен выше. Для вариантов с ухудшением изоляции расчеты выполняются по аналогичной методике. В результате расчета цифровых моделей определяются режимные параметры, которые используются как действительные значения измеряемых величин при моделировании измерений напряжений и токов приборами класса 0,1 для 100 циклов измерений.

В сети без повреждения изоляции проводимость распределяется пропорционально длине участков. В случае ухудшения изоляции коэффициент  $m$  не соответствует распределению проводимости по участкам сети. Поэтому выполняется перерасчет коэффициента распределения проводимости с выдвиганием гипотез о месте повреждения: гипотеза 1 – повреждение на первом участке; гипотеза 2 – повреждение на втором участке; гипотеза 3 – повреждение на третьем участке.

С учетом полученных коэффициентов распределения проводимости изоляции выполняется расчет П-образной схемы замещения линии с отпайкой по методу узловых потенциалов по трем вариантам уравнений цепи:

Вариант 1 – расчет цепи по МУП без дополнительных уравнений (приведен выше);

Вариант 2 – расчет цепи по МУП с дополнительными уравнениями для токов. К уравнениям по МУП добавим дополнительные уравнения для токов  $I_{10}$ ,  $I_{02}$ ,  $I_{03}$ , измеренных в месте присоединения отпайки:

$$\left| \mathcal{R}_1 - \frac{m \cdot Y}{2} \cdot \left[ U_1 \cdot \left( 2 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \mathcal{R}_1 \cdot Z_1 \right] - I_{10} = 0; \right. \quad (13)$$

$$\left| \mathcal{R}_2 + \frac{(1-m) \cdot Y}{2} \cdot \left[ U_2 \cdot \left( 2 + \frac{(1-m) \cdot Y \cdot Z_2}{2} \right) + \mathcal{R}_2 \cdot Z_2 \right] - I_{02} = 0; \right. \quad (14)$$

$$\left| \mathcal{R}_3 + \frac{Y_3}{2} \cdot \left[ U_3 \cdot \left( 2 + \frac{Y_3 \cdot Z_3}{2} \right) + \mathcal{R}_3 \cdot Z_3 \right] - I_{03} = 0, \right. \quad (15)$$

Вариант 3 – расчет цепи по МУП с дополнительными уравнениями для напряжений. К уравнениям по МУП добавим дополнительные уравнения для напряжений  $U_0$  в месте присоединения отпайки:

$$\left| U_1 \cdot \left( 1 + \frac{m \cdot Y \cdot Z_1}{2} \right) - \mathcal{R}_1 \cdot Z_1 \right| - U_0 = 0; \quad (16)$$

$$\left| U_2 \cdot \left( 1 + \frac{(1-m) \cdot Y \cdot Z_2}{2} \right) + \mathcal{R}_2 \cdot Z_2 \right| - U_0 = 0; \quad (17)$$

$$\left| U_3 \cdot \left( 1 + \frac{Y_3 \cdot Z_3}{2} \right) + \mathcal{R}_3 \cdot Z_3 \right| - U_0 = 0, \quad (18)$$

Расчет данных уравнений выполняется в пакете MathCAD и далее анализируются полученные результаты. Поскольку при повреждении изоляции возрастают активные токи утечки, что приводит к увеличению активной проводимости, то это позволяет в допустимых пределах рассчитать погрешности определения активных проводимостей. Для реактивных проводимостей получается большая погрешность ее определения, из-за малой величины самой реактивной проводимости (погрешности определения превышают саму величину реактивной проводимости). Поэтому анализ выполнен только для активных проводимостей.

При повреждении на одном из участков сети возрастает величина проводимости изоляции поврежденного участка, при этом на неповрежденном участке сохраняется малая величина проводимости и при расчете получается, что погрешность определения проводимости изоляции неповрежденного участка превышает саму проводимость. Поэтому эти значения в таблицах не приводятся. Во 2-м варианте уравнений для сравнения приведены результаты по всем участкам сети, так как 2-й вариант (с дополнительными уравнениями по току) дает большую точность в расчетах, тем самым, уменьшая величину погрешности. Это связано со значительным изменением токов в цепи за счет довольно существенных токов утечки на землю.

Проанализируем результаты исследований по первому участку (табл. 3 и 4), для второго и третьего участка анализ проводится аналогично.

Таблица 3

Погрешности определения проводимости изоляции по МУП при повреждении на первом участке со 100-кратным увеличением проводимости изоляции

Гипотеза	Вариант уравнений	Gmax, %	Gmin, %	G3max,%	G3min,%	Gsmax,%	Gsmin,%
1	1	4,23	-3,88	-	-	0,314	-0,359
	2	0,617	-0,378	127	-201	0,247	-0,187
	3	3,01	-5,57	-	-	0,452	-0,446
2	1	229	225	-	-	-611	-654
	2	-73,3	-106	-36,3	-41,8	-73,2	-106
	3	281	266	-	-	-96,3	-118
3	1	-147	-154	-	-	-28,9	-31,9
	2	-99,2	-107	14794	951	-50,1	-103
	3	-15,4	-270	-	-	34,9	-184

Обозначение в таблице вариантов уравнений: 1 – без дополнительных уравнений; 2 – с дополнительными уравнениями для токов; 3 – с дополнительными уравнениями для напряжений.

Таблица 4

Проводимости изоляции по МУП для случая повреждения на первом участке со 100-кратным увеличением проводимости изоляции

Гипотеза	Вариант уравнений	Gmax, См	Gmin, См	G3max, См	G3min, См	Gsmax, См	Gsmin, См
1	1	0,03777	0,03483	0,001641	-0,001545	0,03647	0,03623
	2	0,03646	0,03610	0,0002728	-0,0001209	0,03645	0,03629
	3	0,03733	0,03422	0,002224	-0,001130	0,03652	0,03620
2	1	0,1192	0,1177	-0,3045	-0,3195	-0,1856	-0,2014
	2	0,009679	-0,002296	0,00007645	0,00006986	0,009755	-0,002220
	3	0,1380	0,1326	-0,1314	-0,1445	0,001347	-0,006512
3	1	-0,01694	-0,01943	0,04418	0,04281	0,02587	0,02475
	2	0,0002916	-0,002424	0,01787	0,001261	0,01815	-0,001162
	3	0,03067	-0,06178	0,03228	0,01838	0,04905	-0,03055

Полученные результаты показывают, что при повреждении на первом участке (см. табл. 3) по всем трем вариантам уравнений цепи проходит гипотеза 1, по которой предполагается повреждение на участке (1-0). В данном случае погрешности определения проводимости изоляции получаются наименьшими для гипотезы 1, а именно:

– по первому варианту уравнений цепи, погрешности определения суммарной проводимости изоляции составляют  $G_{smin} = -0,359 \%$  и по главной линии  $G_{max} = 4,23 \%$ ;

– по второму варианту уравнений цепи соответственно  $G_{\max} = 0,247 \%$  и по главной линии  $G_{\max} = 0,617 \%$ ;

– по третьему варианту уравнений цепи соответственно  $G_{\max} = 0,452 \%$  и по главной линии  $G_{\min} = -5,57 \%$ .

Для неправильных гипотез эти значения во много раз больше. Если погрешность превышает саму величину проводимости, то проводимость может получиться отрицательной. Это говорит о том, что предполагаемая гипотеза является неправильной. Кроме того, при повреждении на первом участке главной линии, проводимость изоляции главной линии и суммарная проводимость сети увеличиваются на один и тот же порядок и по величине их значения близки (см. табл. 4), а именно, по первому варианту уравнений суммарная проводимость составляет  $G_{\max} = 0,3647 \text{ См}$  и  $G_{\min} = 0,03623 \text{ См}$ , проводимость главной линии  $G_{\max} = 0,03777 \text{ См}$  и  $G_{\min} = 0,03483 \text{ См}$ .

Поскольку действительная величина проводимости изоляции не известна, то для анализа результатов исследований принимаются следующие критерии:

1) критерий правильной гипотезы – проводимость поврежденного участка близка к суммарной проводимости сети;

2) критерий неправильной гипотезы – отрицательная величина проводимости изоляции.

Результаты, полученные по гипотезе 1 для первого варианта уравнений цепи, подтверждают правильность гипотезы по критерию правильной гипотезы. Результаты, полученные по второму и третьему вариантам уравнений цепи по гипотезе 1, также соответствуют данному критерию. Для неверных гипотез 2 и 3 по всем трем вариантам уравнений цепи (см. табл. 4) проводимости предполагаемых участков повреждения по величине и порядку увеличения не соответствуют суммарной проводимости и даже в некоторых случаях получаются отрицательными, что не соответствует критерию правильной гипотезы. Следовательно, результаты подтверждают неверность гипотез 2 и 3 при повреждении на первом участке.

Далее исследования проводятся для цепи по МКТ по такому же алгоритму, что и для МУП и сопоставляются результаты исследований.

Подтверждение гипотез, полученных при анализе результатов расчета по МУП и МКТ, приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Подтверждение гипотез  
(100-кратное увеличение проводимости при расчете по МУП)

Участок ухудшения изоляции	Вариант уравнений	Критерии подтверждения гипотезы		Выбор гипотезы
		по допустимой погрешности	по величине проводимости изоляции	
1	2	3	4	5
1	1	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

1	2	3	4	5
2	1	Гипотеза 2	Гипотеза 2	Гипотеза 2
	2	Гипотеза 2	Гипотеза 2	Гипотеза 2
	3	Гипотеза 2	Гипотеза 2	Гипотеза 2
3	1	Гипотезы 1, 2, 3	Гипотеза 3	Гипотеза 3
	2	Гипотезы 1, 2, 3	Гипотеза 3	Гипотеза 3
	3	Гипотезы 1, 3	Гипотеза 3	Гипотеза 3

Таблица 6

Подтверждение гипотез  
(100-кратное увеличение проводимости при расчете по МКТ)

Участок ухудшения изоляции	Вариант уравнений	Критерии подтверждения гипотезы		Выбор гипотезы
		по допустимой погрешности	по величине проводимости изоляции	
1	1	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	2	Гипотезы 1, 2, 3	Гипотезы 1, 2	Гипотезы 1, 2
	3	Гипотезы 1, 2, 3	Гипотеза 1	Гипотеза 1
2	1	Гипотеза 2	Гипотеза 2	Гипотеза 2
	2	Гипотезы 1, 2	Гипотезы 1, 2	Гипотезы 1, 2
	3	Гипотеза 2	Гипотеза 2	Гипотеза 2
3	1	Гипотезы 1, 2, 3	Гипотеза 3	Гипотеза 3
	2	Гипотезы 1, 2, 3	Гипотеза 3	Гипотеза 3
	3	Гипотезы 1, 3	Гипотеза 3	Гипотеза 3

Таким образом, результаты данных исследований, полученные при 100-кратном увеличении проводимости изоляции, с использованием в расчетах МУП, позволяют более точно определить участок повреждения сети и величину суммарной проводимости изоляции (с погрешностью 1–3%), а также величину проводимости изоляции поврежденного участка (с погрешностью не более 10%). Расчеты по МКТ для некоторых вариантов уравнений дают сомнительный результат, лишь фиксируя по некоторым гипотезам – факт ухудшение изоляции.

Для уточнения минимальной величины увеличения проводимости изоляции, позволяющей обнаружить ее ухудшение и определить место ухудшения изоляции, проводятся дополнительные исследования для 10-кратного и 20-кратного увеличения проводимости изоляции по тому же алгоритму, что и при 100-кратном ее увеличении.

Сначала проводятся исследования для относительно небольшого ухудшения изоляции (10-кратного увеличения проводимости) в цепи с П-образной схемой замещения по МУП и МКТ для трех вариантов уравнений по первому участку повреждения.

В результате исследований установлено, что при 10-кратном увеличении проводимости изоляции по некоторым гипотезам получают сомнительные результаты, так как из-за большой погрешности определения параметров

изоляция увеличивается диапазон изменения величины проводимости между максимальными и минимальными значениями в который могут попасть значения проводимостей для неверных гипотез хоть и с малой вероятностью. Это не позволяет достаточно точно определить величину проводимости изоляции и участок ее ухудшения и поэтому для данных гипотез можно только установить факт ухудшения изоляции в сети. Расчеты по второму и третьему участкам при 10-кратном увеличении проводимости не рассматриваются, поскольку анализ и результаты аналогичны первому участку повреждения.

Для получения более точного значения проводимости изоляции поврежденного участка и возможности определения участка повреждения, исследуем цепь при 20-кратном увеличении проводимости изоляции на первом участке по МУП. Поскольку МКТ дает сомнительный результат по некоторым гипотезам как при 10-кратном, так и при 100-кратном увеличении проводимости изоляции, то в данных расчетах МКТ не рассматриваем.

Подтверждение гипотез при 20-кратном увеличении проводимости изоляции на первом участке при расчете по МУП приведены в табл. 7.

Таблица 7

Подтверждение гипотез  
(20-кратное увеличение проводимости при расчете по МУП)

Участок ухудшения изоляции	Вариант уравнений	Критерии подтверждения гипотезы		Выбор гипотезы
		по допустимой погрешности	по величине проводимости изоляции	
1	1	Гипотезы 1; 3	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

Проведенные исследования показали, что минимальной величиной ухудшения изоляции, позволяющей определить участок повреждения и его проводимость при расчете цепи по МУП, с использованием измерительных приборов класса точности 0,1 является 20-кратное увеличение проводимости изоляции поврежденного участка.

При выборе гипотезы поврежденного участка за верную гипотезу принимается та, номер которой соответствует номеру участка повреждения. Если номера не совпадают или несколько гипотез удовлетворяют критериям подтверждения гипотезы, то это означает, что на данном участке повреждения при расчете цепи пользоваться данным вариантом уравнений нельзя, так как этот вариант дает сомнительные результаты, не позволяющие определить участок повреждения и величину его проводимости изоляции.

В данной работе выполнены исследования с применением измерительных приборов класса точности 0,1 при моделировании 100 циклов измерений напряжений, токов и углов сдвига между напряжением и током. Исследованы возможности использования приборов класса 0,5 для определения

проводимости изоляции при 20-кратном, 30-кратном и 100-кратном ее увеличении в результате повреждения изоляции.

Исследования, проведенные для всех трех участков цепи со 100-кратным увеличением проводимости изоляции поврежденного участка при использовании приборов класса точности 0,5, также как и класса точности 0,1 позволяют достаточно точно определить участок повреждения и величину проводимости изоляции.

Использование измерительных приборов класса точности 0,5 несущественно повышает погрешности результатов расчета, и диапазон изменения проводимости изоляции получается несколько шире, чем при использовании измерительных приборов класса точности 0,1.

Для уточнения минимальной кратности увеличения проводимости изоляции, при использовании приборов класса 0,5 проводятся дополнительные исследования при 20-кратном и 30-кратном увеличении проводимости изоляции поврежденного участка в цепи с П-образной схемой замещения по МУП по методике приведенной выше.

Подтверждение гипотез, полученных по анализу результатов расчета при 20-кратном и 30-кратном увеличении проводимости изоляции на первом участке, приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8

Подтверждение гипотез  
(20-кратное увеличение проводимости при расчете по МУП)

Участок ухудшения изоляции	Вариант уравнений	Критерии подтверждения гипотезы		Выбор гипотезы
		по допустимой погрешности	по величине проводимости изоляции	
1	1	Гипотезы 1; 3	СР	СР
	2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

В таблице принято обозначение СР – сомнительный результат

Таблица 9

Подтверждение гипотез  
(30-кратное увеличение проводимости при расчете по МУП)

Участок ухудшения изоляции	Вариант уравнений	Критерии подтверждения гипотезы		Выбор гипотезы
		по допустимой погрешности	по величине проводимости изоляции	
1	1	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	2	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1
	3	Гипотеза 1	Гипотеза 1	Гипотеза 1

Из данных таблиц следует, что для приборов класса точности 0,5 при 20-кратном увеличении проводимости изоляции поврежденного участка по некоторым гипотезам получается сомнительный результат, в то время как при

30-кратном увеличении проводимости, можно определить проводимость изоляции и участок ее повреждения.

В табл. 10 и 11 приведены погрешности определения суммарной проводимости изоляции при 10-кратном, 20-кратном, 30-кратном и 100-кратном ее увеличении на первом участке по верной гипотезе 1 с применением измерительных приборов соответственно класса точности 0,5 и 0,1.

Таблица 10

Применение приборов класса точности 0,5

Кратность увеличения проводимости изоляции	Суммарная проводимость	Вариант уравнений		
		1	2	3
20-кратное	G <sub>max</sub> , %	5,1	8,16	12,9
	G <sub>min</sub> , %	-16,2	-5,96	-37,6
	G <sub>ср</sub> , %	10,7	7,06	25,2
30-кратное	G <sub>max</sub> , %	3,34	4,99	8,6
	G <sub>min</sub> , %	-9,57	-2,66	20,7
	G <sub>ср</sub> , %	6,46	3,83	14,7
100-кратное	G <sub>max</sub> , %	1,11	1,52	3,72
	G <sub>min</sub> , %	-3,29	-1,07	-6,75
	G <sub>ср</sub> , %	2,2	1,3	5,24

Таблица 11

Применение приборов класса точности 0,1

Кратность увеличения проводимости изоляции	Суммарная проводимость	Вариант уравнений		
		1	2	3
10-кратное	G <sub>max</sub> , %	4,68	2,55	7,79
	G <sub>min</sub> , %	-2,03	-2,99	-13,1
	G <sub>ср</sub> , %	3,36	2,77	10,45
20-кратное	G <sub>max</sub> , %	1,76	0,515	2,09
	G <sub>min</sub> , %	-2,23	-0,628	-7,34
	G <sub>ср</sub> , %	2,00	0,57	4,72
100-кратное	G <sub>max</sub> , %	0,314	0,247	0,452
	G <sub>min</sub> , %	-0,359	-0,187	-0,446
	G <sub>ср</sub> , %	0,34	0,22	0,45

Из данных таблиц видно:

– при большей кратности увеличения проводимости изоляции (100-кратном) получаются наименьшие проценты погрешности.

Для проверки методики определения проводимости изоляции относительно земли проведены экспериментальные исследования в распределительных сетях 35/10 кВ ПС Нязепетровск-Ункурда-Аптряково на основе измерения режимных параметров сети.

Конфигурация сети представлена на рисунке 3.

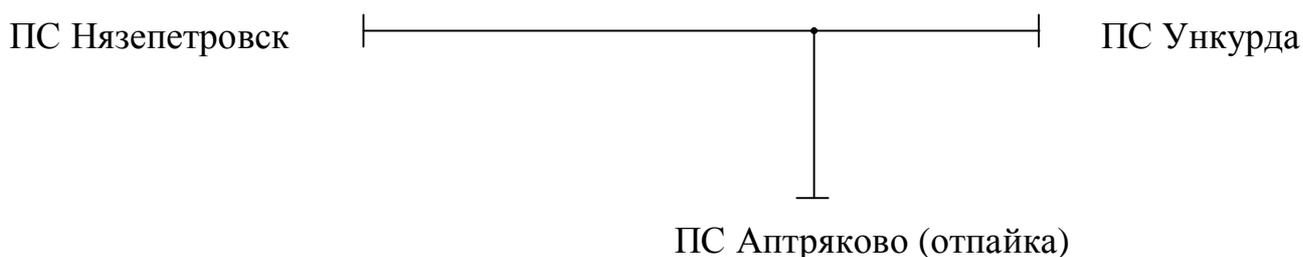


Рис. 3. Конфигурация сети ПС Нязепетровск-Ункурда-Аптряково

Измерения текущих режимных параметров сети выполнялись для фазы А одновременно на ПС Нязепетровск (напряжением 35 кВ), на ПС Ункурда (со стороны 10 кВ), на ПС Аптряково (со стороны 10 кВ).

Характеристики воздушной линии: марка провода АС-70, длина линии между ПС Нязепетровск и ПС Ункурда – 33,5 км, длина отпаечной линии к ПС Аптряково – 22,5 км, расстояние от места присоединения отпайки до ПС Ункурда – 1 км.

Измерения выполнялись с учетом относительной погрешности приборов и масштабных преобразователей. Измерения проводились приборами Парма ВАФ-А (вольтамперфазометр). Результаты измерения режимных параметров по ПС Нязепетровск-Ункурда-Аптряково, приведенные к стороне 35 кВ, представлены в табл. 12.

Таблица 12

Результаты измерений режимных параметров сети

ПС Нязепетровск			ПС Ункурда			ПС Аптряково		
U1, В	I1, А	cos $\phi$ 1	U2, В	I2, А	cos $\phi$ 2	U3, В	I3, А	cos $\phi$ 3
Время утреннего максимума нагрузки								
20642	23,30	0,922	20300	17,09	0,921	20435	6,21	0,925
20639	23,61	0,922	20292	17,44	0,921	20439	6,17	0,925
20631	23,88	0,922	20283	17,75	0,921	20441	6,13	0,925
Дневное время								
20653	18,30	0,922	20378	13,62	0,921	20522	4,68	0,925
20655	18,15	0,922	20380	13,54	0,921	20525	4,61	0,925
20658	18,06	0,922	20384	13,49	0,921	20526	4,57	0,925
Время вечернего максимума нагрузки								
20650	20,27	0,922	20348	15,03	0,921	20455	5,24	0,925
20648	20,63	0,922	20341	15,27	0,921	20450	5,36	0,925
20643	20,99	0,922	20331	15,58	0,921	20447	5,41	0,925

По результатам измерений был выполнен расчет полной проводимости изоляции воздушной линии электропередачи. Поскольку в электротехническом справочнике активная проводимость для воздушных линий на 35 кВ не приводится, то для проверки предложенной методики выполняется сравнение рассчитанных значений реактивной проводимости со справочными данными. Результаты расчета проводимости изоляции приведены в табл. 13.

Таблица 13

Результаты расчета проводимости изоляции

Расчетные данные полной проводимости		Справочные данные реактивной проводимости	
$\underline{Y}=G+iB, \text{ См}$	$\underline{Y}_3= G_3+iB_3, \text{ См}$	$B, \text{ См}$	$B_3, \text{ См}$
Время утреннего максимума нагрузки			
7,273E-4+9,146E-5	1,02E-5+6,143E-5	9,146E-5	6,143E-5
7,346E-4+9,146E-5	5,188E-5+6,143E-5		
7,669E-4+9,146E-5	1,044E-5+6,143E-5		
Дневное время			
5,538E-4+9,146E-5	1,592E-4+6,143E-5	9,146E-5	6,143E-5
5,329E-4+9,146E-5	2,135E-4+6,143E-5		
5,276E-4+9,146E-5	2,075E-4+6,143E-5		
Время вечернего максимума нагрузки			
6,105E-4+9,146E-5	2,95E-6+6,143E-5	9,146E-5	6,143E-5
6,222E-4+9,146E-5	6,723E-6+6,143E-5		
6,353E-4+9,146E-5	1,746E-5+6,143E-5		

Из полученных результатов видно, что при расчете полной проводимости изоляции, ее реактивная составляющая совпадает со справочными данными, что позволяет на практике применять разработанную методику определения параметров изоляции фаз сети относительно земли в распределительных электрических сетях 6...35 кВ.

По аналогичной методике можно выполнить расчет проводимости изоляции фаз В и С сети относительно земли.

Приведенные выше аналитические исследования по определению проводимости изоляции и погрешности их определения в распределительных электрических сетях 6...35 кВ и результаты проведенного практического эксперимента предполагают в дальнейшем реализацию системы непрерывного контроля изоляции в режиме постоянного отслеживания режимных параметров сети в виде диагностики. Данная диагностика на ранней стадии позволит фиксировать ухудшение состояния изоляции и определить ее участок, тем самым предупредить и своевременно предотвратить аварийные ситуации, вызванные пробоем изоляции – в случае ее повреждения.

Данный контроль можно осуществить на основе, существующих на практике, современных автоматизированных систем контроля за счет расширения их интеллектуальных возможностей. Для непрерывного контроля изоляции в режиме реального времени исходными данными являются сведения о режимных параметрах сети. Сведения о режимных параметрах электросети (токи, напряжения, угол сдвига фаз между напряжением и током), поступающие на устройства сбора данных с последующей передачей данных в центр мониторинга, где осуществляется прием, накопление и обработка данных, с дальнейшей передачей результатов мониторинга состояния изоляции оперативному персоналу на главный щит управления позволят, с применением вышеизложенной методики, контролировать состояние изоляции, и в случае ее ухудшения – определить участок повреждения в распределительной сети без отключения ее потребителей и своевременно устранить дефекты изоляции. Тем самым данная диагностика режимных параметров сети позволит повысить безопасность работы распределительных электрических сетей.

Наиболее эффективна и актуальна данная методика для линий на фарфоровых изоляторах, дефекты которых визуально не обнаружить. В энергосистеме линии на фарфоровых изоляторах напряжением 6...35 кВ составляют 80%.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научно-технической задачи – определение параметров изоляции фаз сети относительно земли на основании измерения режимных параметров, позволяющее повысить надежность и безопасность в работе распределительных электрических сетей 6...35 кВ с изолированной нейтралью.

На основании исследований, проведенных в данной работе, получены следующие основные результаты и выводы:

1. Установлено, что при определении проводимости изоляции фаз сети относительно земли минимальные погрешности получаются при использовании П-образной схемы замещения.

2. Установлено, что использование в уравнениях цепи дополнительно измеренных токов в месте присоединения отпайки позволяет уменьшить погрешность определения проводимости изоляции фаз сети относительно земли.

3. Разработаны цифровые модели цепи, при расчете которых определяются режимные параметры, используемые в дальнейшем как действительные значения измеряемых величин при моделировании измерений напряжений и токов для расчета параметров изоляции относительно земли по полученным формулам.

4. Исследованы возможности полученных аналитических зависимостей путем анализа результатов расчета параметров изоляции и погрешностей их

определения в зависимости от степени ухудшения изоляции в месте повреждения. В результате чего установлено:

1) Проводимость изоляции по верным гипотезам предполагаемых участков повреждения, отвечает следующим критериям:

- критерий правильной гипотезы – проводимость изоляции поврежденного участка близка к суммарной проводимости сети;
- критерий неправильной гипотезы – отрицательная величина проводимости изоляции.

2) Метод узловых потенциалов (МУП), применяемый при расчете цепи, позволяет точно определить участок повреждения и величину его проводимости изоляции относительно земли, а также суммарную проводимость всей сети, при ухудшении изоляции, начиная с 20-кратного увеличении ее проводимости и выше при использовании измерительных приборов класса 0,1.

Более точные результаты получаются при 100-кратном увеличении проводимости изоляции. При этом погрешности для верных гипотез с использованием МУП составляют:

- По суммарной проводимости сети – от 1% до 3%;
- По проводимости поврежденного участка – не более 10%.

3) Суммарная проводимость изоляции сети и поврежденного участка, начиная с 20-кратного увеличении ее проводимости и выше, при расчете по МУП отвечает требованиям по критериям приведенным выше.

4) Метод контурных токов (МКТ), применяемый при расчете цепи со 100-кратным увеличением проводимости изоляции поврежденного участка при использовании измерительных приборов класса точности 0,1 для варианта без дополнительных уравнений и варианта с дополнительными уравнениями по напряжению позволяет определить величину проводимости изоляции поврежденного участка и места ее ухудшения, а для варианта с дополнительными уравнениями по току по некоторым гипотезам лишь фиксирует факт ухудшения изоляции. При этом погрешности для верных гипотез с использованием МКТ составляют:

- По суммарной проводимости сети – менее 1%,
- По проводимости поврежденного участка – в пределах 7%.

5) Суммарная проводимость изоляции сети и поврежденного участка при 100-кратном увеличении ее проводимости при расчете по МКТ для верных гипотез отвечает требованиям по критериям приведенным выше.

5. Исследовано влияние класса точности измерительных приборов на результаты расчетов. В результате чего установлено:

1) Для измерительных приборов класса точности 0,1 минимальной величиной ухудшения изоляции, позволяющей определить участок повреждения и его проводимость, является 20-кратное увеличение проводимости изоляции поврежденного участка; для приборов класса точности 0,5 такой величиной является 30-кратное увеличение проводимости.

2) Чем больше величина проводимости изоляции поврежденного участка, то есть кратность ее увеличения, тем точнее определяется участок повреждения и величина проводимости изоляции.

3) Использование измерительных приборов класса точности 0,5 также как и 0,1 позволяет достаточно точно определить участок повреждения изоляции и величину его проводимости при расчете цепи, имеющей П-образную схему замещения, рассчитанную по МУП при ухудшении изоляции со 100-кратным ее увеличением на поврежденном участке.

6. Аналитические исследования, представленные в данной работе, по определению проводимости изоляции и погрешности их определения в распределительных электрических сетях 6...35 кВ и проведенный практический эксперимент предполагают в дальнейшем реализацию системы непрерывного контроля изоляции в реальном времени в виде диагностики на основе измерения режимных параметров сети. Данная диагностика позволит на ранней стадии обнаружить ухудшение изоляции и определить ее участок в распределительной сети без отключения потребителей, то есть, не внося изменения в режим работы сети, и своевременно устранить дефекты изоляции, тем самым повысить безопасность работы распределительных сетей.

7. Предложенный метод по определению проводимости изоляции фаз сети относительно земли и определению участка ухудшения изоляции в распределительных электрических сетях 6...35 кВ по результатам измерения режимных параметров сети внедрен Центральными электрическими сетями филиала ОАО «МРСК Урала»-«Челябэнерго», а также рекомендован для применения Южно-Уральскому государственному университету при подготовке специалистов электротехнических специальностей.

#### **Научные публикации по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Хусаинов, Ш.Н. Анализ методов определения проводимости изоляции для линии с отпайкой / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 8. – № 20(92). – С. 32–37.

2. Хусаинов, Ш.Н. Исследование влияния величины проводимости изоляции в месте повреждения на точность ее определения косвенным методом / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – № 11(111). – С. 9–15.

#### **Другие научные публикации по теме диссертации**

3. Нараева, Р.Р. Анализ погрешности результата расчета параметров изоляции, в зависимости от выбранных схем замещения линии электропередачи / Р.Р. Нараева, Ш.Н. Хусаинов // Наука и технологии: тезисы докладов XXVII Российской школы. – Миасс: МСНТ, 2007. – С. 147.

4. Нараева, Р.Р. Анализ погрешности результатов расчета параметров изоляции, в зависимости от выбранных схем замещения линии электропередачи

/ Р.Р. Нараева, Ш.Н. Хусаинов // Наука и технологии: сб. науч. тр. – М: РАН, 2007. – С. 364–374.

5. Нараева, Р.Р. Определение величины проводимости изоляции в линии с отпайкой и метод их диагностики / Р.Р. Нараева, Ш.Н. Хусаинов // Наука и технологии: тезисы докладов XXVIII Российской школы. – Миасс: МСНТ, 2008. – С. 107.

6. Нараева, Р.Р. Исследование величины проводимости изоляции в месте повреждения // Наука ЮУрГУ: материалы 60-й юбилейной научной конференции. Секция «Технические науки». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – Т.1. – 2008. – С. 178–181.

7. Хусаинов, Ш.Н. Определение места повреждения участка линии с отпайкой и величины проводимости изоляции в месте повреждения по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева // Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2008. Вып. 15. – С. 215–222.

Нараева Рузалия Раисовна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ И МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ  
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6...35 кВ

Специальность 05.26.01– «Охрана труда (электроэнергетика)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 16.02.2009. Формат 60x84 1/16. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 41/53.

---

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.