

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

На правах рукописи

**Карпов Алексей Сергеевич**

**Исследование опасных влияний высоковольтной сети каскадов ГЭС на подземные проводные коммуникации и разработка мер по повышению надежности их работы в условиях с низкой проводимостью грунта**

*Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений*

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

Санкт-Петербург - 2010

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

**Научный  
руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Ефимов Борис Васильевич  
**Официальные  
оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Фоминич Эдуард Николаевич

доктор технических наук, профессор  
Халилов Фрудин Халилович

**Ведущая  
организация:** Открытое акционерное общество  
«МРСК Северо-Запада» «КолЭнерго»

Защита состоится «10» декабря 2010 г. в 10 часов в ауд. \_\_\_\_\_ на заседании  
диссертационного совета Д 212.229.11 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 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент

Попов М.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

---

### **Актуальность проблемы.**

Актуальность исследований определяется необходимостью обеспечения надежности систем связи, контроля и управления совместной работой электроэнергетических объектов, в том числе электростанций. Нормативными документами снижение опасности влияний высоковольтной сети предусматривает удаление линий связи от воздушных линий электропередачи (ВЛ), использование разделительных пунктов и защиту концевых аппаратов. При этом защита элементов самих кабелей связи не обеспечивается. Более того, расчеты показывают, что срабатывание защитных разрядников увеличивает опасность токов и напряжений для элементов кабеля связи – жил и изоляции как на трассе линии, так и на пунктах подключения.

Сложность решения проблемы электромагнитной совместимости магистральных линий и экспериментальных исследований влияний заключается в комбинированном действии аварийного тока в ВЛ и потенциалов на заземляющих контурах электростанций. Кроме того, в условиях действующей сети экспериментально можно зарегистрировать только значения токов и напряжений по концам протяженных подземных коммуникациях. Физически невозможно разделение влияния наведенной Э.Д.С. и потенциалов заземлителей по концам линии, а также токов в одном опыте, что затрудняет интерпретацию опытных данных.

Объектом исследований электромагнитной совместимости с высоковольтной сетью являются подземные магистрали, имеющие электрическую связь с контурами заземления станций и подстанций. Эти вопросы приобретают особую актуальность в районах с высоким удельным сопротивлением грунта и для каскадов относительно небольших ГЭС, имеющих многочисленные линии связи между отдельными электростанциями. Эта проблема характерна для Кольско-Карельского региона. Указанные исследования должны носить расчетно-экспериментальный характер. Ввиду сложности организации экспериментальных исследований с имитацией аварийных токов в действующих высоковольтных сетях, выполнением одновременных регистраций в разных точках сети и в элементах подземных коммуникаций, такие опыты являются уникальными. Поэтому, их результаты должны рассматриваться в качестве критериев точности расчетных методов, позволяющих выполнять многовариантные исследования в широком диапазоне изменения влияющих токов и напряжений, параметров грунта и структуры электрических сетей и других факторов.

### **Цель работы:**

Исследование наведённых напряжений и токов в подземных магистральных линиях связи при замыканиях в высоковольтной сети и разработка рекомендаций по совершенствованию защиты кабельных линий и подключенной аппаратуры.

### **Научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна работы.**

1. Разработана методика расчета компонент электромагнитного поля в подземных коммуникациях с учетом неоднородности расположения трассы линии связи по отношению к воздушным высоковольтным линиям.

2. Получено аналитическое решение для всех составляющих электрического поля в земле, созданного горизонтальным диполем в воздухе и численная методика расчета наведенной Э.Д.С. на кабельной линии.

3. Разработана методика расчетов распределения токов и напряжений в подземных кабелях связи под влиянием наведенной Э.Д.С. и распределенных потенциалов земли при любых граничных условиях.

4. В действующей сети одного из каскадов ГЭС, расположенного на Кольском полуострове, (Пазский каскад ГЭС) проведены экспериментальные исследования влияния высоковольтной сети на подземные линии связи.

5. Разработана методика и устройство ограничения перенапряжений и опасных токов, наводимых в проводных подземных кабелях связи, цепях контроля, управления и автоматики.

**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 согласованием результатов расчетов с экспериментальными данными.

### **Практическое значение работы.**

1. Разработан программный комплекс для расчета токов и напряжений в подземных проводных коммуникациях при замыканиях в высоковольтной сети.

2. Исследован процесс развития повреждений элементов линии связи.

3. Разработана методика экспериментальных исследований в действующей сети, позволяющая обеспечить безопасность для персонала и измерительного оборудования, частотное разделение экспериментальных и рабочих токов, а также бесконтактные измерения токов в заземляющих проводниках.

4. Разработано защитное устройство для снижения опасности влияния аварийных токов в высоковольтной сети.

**Реализация результатов работы.** На основе разработанных методов, а также результатов выполненных расчетов и экспериментов был сформирован программный комплекс для исследований наведённых напряжений и токов в кабелях связи, а также для линий связи разработано и внедрено защитное устройство ограничивающее опасное влияние аварийных токов высоковольтной сети.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности (в 2006 г.). Результаты диссертационной работы прошли успешное апробирование на каскаде Пазских ГЭС (КПГЭС) Филиала «Кольский ОАО «ТГК-1», что подтверждено актом о внедрении.

**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 151 страницы основного текста, 75 рисунков, 27 таблиц и список литературы из 60 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

---

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

В первой главе рассмотрены существующие методы исследования электромагнитного влияния высоковольтной сети на подземные коммуникации. Сформулирована цель диссертационной работы и обозначены подходы к решению проблемы.

Сложность определения электромагнитного влияния на подземные коммуникации связана с неоднозначностью распределения аварийных токов в высоковольтных сетях с несколькими источниками энергии. При замыканиях на землю токи протекают через заземляющие контура ГЭС и распределительных устройств, заземленные нейтрали силовых трансформаторов и по элементам подземных коммуникаций.

При низкой удельной проводимости грунта доля токов, ответвляющихся по оболочкам подземных линий связи, резко возрастает, а также увеличивается индуктивная связь между воздушной и подземной линиями. Суммарное электромагнитное влияние определяется наложением этих факторов:

- гальванического влияния, то есть повышения потенциалов конечных контуров заземления (электростанций), с которыми линия непосредственно связана, и земли, окружающей эти контура;

- индуктивного влияния аварийных токов в воздушных линиях электропередачи, расположенных в непосредственной близости от кабельных линий.

Экспериментально, в элементах подземной коммуникации могут быть определены только суммарные токи и напряжения. Поэтому, для анализа физики процессов и создания эффективных способов защиты теоретические исследования приобретают особое значение.

В существующей практике влияние аварийных режимов высоковольтной сети на линии связи разделяют на помехи в работе линии связи и опасные влияния для элементов самой кабельной линии. В данной работе рассматриваются только опасные влияния. Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Анализ физических процессов электромагнитного влияния аварийных режимов высоковольтной сети на подземные проводные коммуникации.

2. Нахождение решения уравнений электромагнитного поля токов в воздушной ЛЭП в произвольной точке земли на основе решения для векторного потенциала поля диполя, расположенного над поверхностью земли, и методики расчета распределения наведенной ЭДС по трассе кабельной линии.

3. Разработка методики расчета напряжений и токов, наведенных в элементах подземных проводных коммуникаций, с учетом гальванической и магнитной составляющих влияния аварийных токов в высоковольтной сети.

4. Разработка методики экспериментальных исследований влияний аварийных токов на подземные коммуникации в действующих сетях и выполнение контрольных экспериментальных измерений наведенных напряжений и токов в подземной линии связи в натуральных условиях.

5. Выполнение численных исследований электромагнитного влияния аварийных токов высоковольтной сети на проводные коммуникации.

6. Разработка метода совершенствования защиты элементов связи от электромагнитного влияния аварийных токов высоковольтной сети.

Во второй главе рассматриваются методические вопросы, в том числе дан анализ распределения аварийных токов в элементах сети при низкой проводимости грунта, описаны физические процессы перераспределения напряжения в контурах при аварийных режимах высоковольтной сети, получены аналитические выражения электромагнитного поля вдоль подземных коммуникаций путем интерпретации решения поля диполя для нижнего полупространства, представлена методика расчета распределения напряжений и токов в элементах кабельных линий, показан алгоритм исследований электромагнитной совместимости подземных коммуникаций с

высоковольтной сетью, разработан частотный метод экспериментальных исследований электромагнитного влияния на линии связи в действующих сетях.

Для определения электромагнитного поля линии электропередачи в произвольной точке пространства влияющая линия представляется в виде последовательности горизонтальных электрических диполей, расположенных над землей. Поле линии электропередачи рассматривается как суперпозиция полей элементарных диполей, её образующих. Напряжённость поля диполя выражается через векторный потенциал.

Рассматриваемый диполь (рисунок 1) расположен в точке  $z = h$  на оси  $z$  и ориентирован в  $x$ -направлении. Декартовы координаты выбраны таким образом, что плоскость  $z = 0$  соответствует поверхности земли, а полупространство  $z < 0$  занимает нижняя проводящая область с параметрами  $(\epsilon_0, \mu_0)$ . Верхнее полупространство полагается изотропным, а нижнее может быть как изотропным, так и анизотропным.

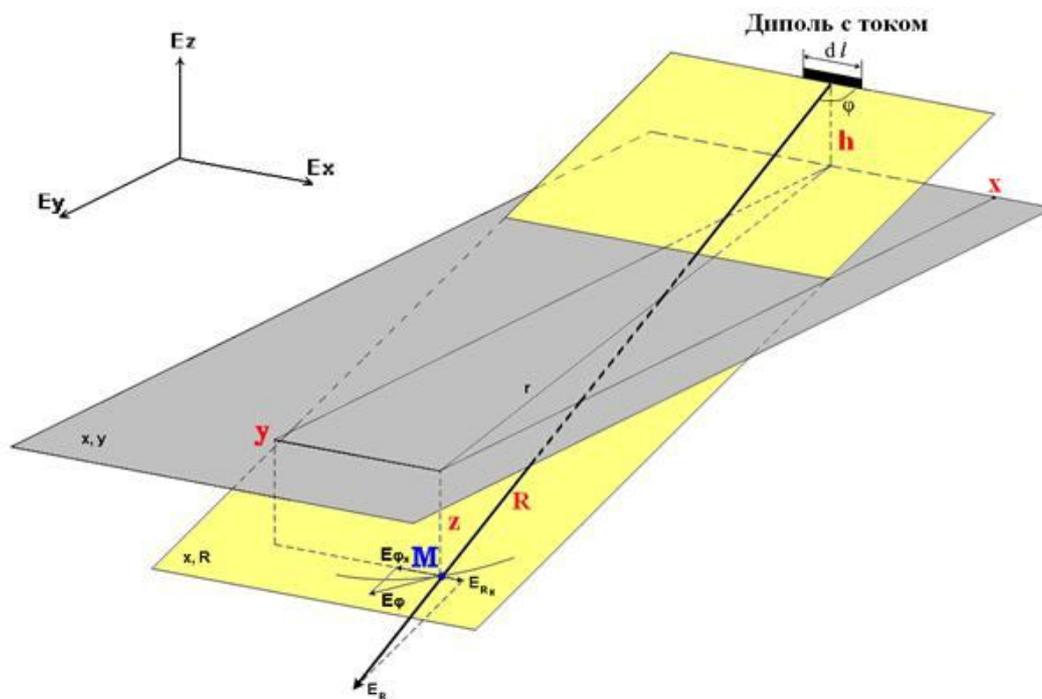


Рисунок 1. Определение в расчетной точке (M) в нижнем полупространстве продольных составляющих напряженности электрического поля, созданного диполем над поверхностью земли

Дж. Уэйтом получены формулы для составляющих электрического поля диполя в нижнем полупространстве ( $z < 0$ ) как функций векторного потенциала ( $\mathbf{A} = \text{rot } \mathbf{H}$ ). 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:

$$E_x = \frac{1}{\sigma} \cdot \left[ -\gamma^2 \cdot \frac{I \cdot \partial l}{4\pi} \cdot \int_0^\infty P_2(\lambda, z) \cdot J_0(\lambda \cdot r) d\lambda \right] + \\ + \frac{I \cdot \partial l}{4\pi} \cdot \frac{-1}{\sigma} \cdot \int_0^\infty \left[ \frac{\lambda \cdot (y^2 - x^2)}{r^3} \cdot J_1(\lambda \cdot r) + \left( \frac{\lambda \cdot x}{r} \right)^2 \cdot J_0(\lambda \cdot r) \right] \cdot [U(\lambda) \cdot P_1(\lambda, z) + P_2(\lambda, z)] d\lambda ;$$

$$E_y = \frac{-1}{\sigma} \cdot \left[ \frac{I \cdot \partial l}{4\pi} \cdot \int_0^\infty \frac{\lambda^2 \cdot x \cdot y}{r^2} \cdot J_0(\lambda \cdot r) + \frac{2\lambda^2 \cdot x \cdot y}{r^3} \cdot J_1(\lambda \cdot r) \right] \cdot [U \cdot P_1(\lambda, z) + P_2(\lambda, z)] d\lambda ;$$

$$E_z = \frac{I \cdot \partial l}{4\pi} \left[ -\gamma^2 \cdot \frac{-1}{\sigma} \cdot \int_0^\infty P_1(\lambda, z) \cdot \left( \frac{-\lambda x}{r} \right) \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda - \int_0^\infty \frac{\lambda x}{r} \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot U(\lambda) \cdot [U(\lambda) \cdot P_1(\lambda, z) + P_2(\lambda, z)] d\lambda \right] ;$$

где  $P_1(\lambda, z) = B(\lambda) \cdot e^{V(\lambda)z} - \left( \frac{U(\lambda)}{\lambda^2} \right) \cdot M(\lambda) \cdot e^{U(\lambda)z}$  и  $P_2(\lambda, z) = M(\lambda) \cdot e^{U(\lambda)z}$  ;

$$M(\lambda) = \left( \frac{\lambda}{U_0(\lambda)} \right) \cdot (1 + R_\perp) \cdot e^{-U_0(\lambda)h}, R_\perp = \frac{U_0(\lambda) - U(\lambda)}{U_0(\lambda) + U(\lambda)} ;$$

$$B(\lambda) = \frac{1}{\lambda^2} \left[ \frac{U_0(\lambda) \cdot (U(\lambda) + U_0(\lambda))}{U_0(\lambda) + \left( \frac{\gamma_0}{\gamma} \right)^2 \cdot V(\lambda)} \right] \cdot M(\lambda).$$

Здесь  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  – расстояние от центра диполя до расчётной точки в плоскости,

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

$\gamma_0^2 = -\varepsilon_0 \mu_0 \omega^2$  и  $\gamma^2 = j\mu_0 \omega \sigma$  – постоянная распространения в воздухе и в грунте;

$\varepsilon$ ;  $\sigma = \sigma + j\varepsilon\omega$  – диэлектрическая проницаемость и проводимость грунта;

$J_0(\lambda r)$  и  $J_1(\lambda r)$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

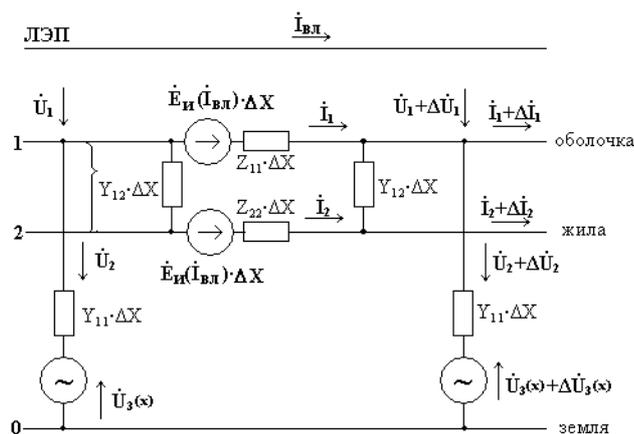
Для оценки опасности влияния на кабельную линию наибольший интерес представляет  $E_x$  – продольная составляющая наведенной Э.Д.С. Определение наведенной ЭДС от тока линии, выполнено путем интегрирования  $E_x$  по длине отрезка линии, расположенного вблизи расчетной точки по формуле  $E_{x_{вкл}} = I_{кз} \cdot \int_{-0.5l_{вкл}}^{0.5l_{вкл}} E_x(x) dx$ .

В результате многовариантных расчетов выбрана оптимальная длина участка влияющей линии, при которой обеспечивается достаточная точность расчетов. Например, для  $\rho = 10000$  Ом·м и ширине сближения до 50 м, с погрешностью не более 1%, достаточно учесть в расчетах отрезки  $l_{вкл} \approx 250$  м, расположенные по обе

стороны от расчетной точки. При снижении  $\rho$  необходимая длина отрезка влияющей линии уменьшается. Это позволяет существенно снизить трудоемкость вычисления распределения наведенной Э.Д.С.

Результаты расчетов токов в контурах ГЭС и наводимой в кабельной линии Э.Д.С. используются при расчете напряжений и токов в элементах кабельной линии.

Расчетные схемы для изучения процессов в кабельной сети и физики возникновения и развития повреждений с учетом влияний токов в элементах линии связи на потенциалы контуров и перераспределение уравнивающих токов, а также с возможностью включения неоднородностей приведены на рисунках 2 и 3.



1 – оболочка; 2 – жила; 0 – земля вблизи кабеля;  
 $Z_{11'} \Delta X$  – собственные сопротивления элементов оболочки и жилы кабеля; комплексная проводимость между элементами оболочки и жилы кабеля  $Y_{12'} \Delta X$  и элемента оболочки по отношению к земле  $Y_{11'} \Delta X$ .  $\dot{E}_H(\dot{I}_{вл}) \cdot \Delta X$  – ЭДС, наведенное полем тока на участке  $\Delta X$ .

Рисунок 2 - Схема замещения кабельной линии связи, подверженной индуктивному влиянию аварийных токов в высоковольтной сети

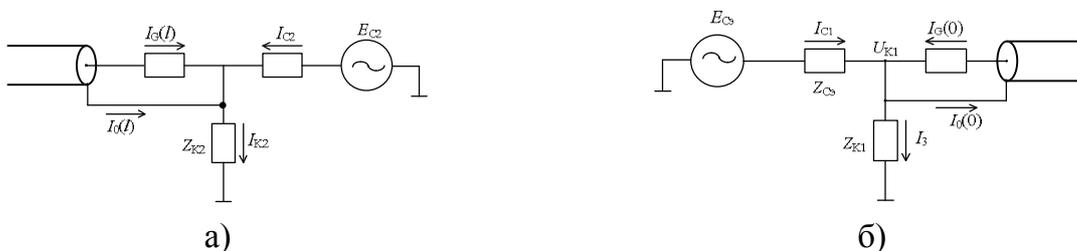


Рисунок 3 - Схемы замещения вначале линии (а) и в конце линии (б).

Схема замещения включает расчетные распределения  $\dot{E}_H(x)$  по трассе линии связи длиной  $l$  и изменение потенциала в земле  $\dot{U}_3(x)$ . Токи и напряжения в кабельной линии можно найти путем решения граничной задачи (при  $x = 0$  и  $x = l$ ) для системы телеграфных уравнений вида ( $U_0$  и  $I_0$  - напряжений и токов в оболочке кабеля,  $U_G$  и  $I_G$  – в жилах кабеля). Граничные условия определялись в зависимости от возможных срабатываний защитных разрядников на концах линии, разрывов элементов линии или перекрытий изоляции.

### Система телеграфных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{d\dot{U}_O}{dx} = Z_{11} \cdot \dot{I}_O + Z_{12} \cdot \dot{I}_G + \dot{E}_H(x) \\ -\frac{d\dot{U}_G}{dx} = Z_{12} \cdot \dot{I}_O + Z_{22} \cdot \dot{I}_G + \dot{E}_H(x) \\ -\frac{d\dot{I}_O}{dx} = (Y_{11} + Y_{12})\dot{U}_O - Y_{12} \cdot \dot{U}_G - Y_{11} \cdot \dot{U}_3(x) \\ -\frac{d\dot{I}_G}{dx} = -Y_{12} \cdot \dot{U}_O + Y_{12} \cdot \dot{U}_G \end{array} \right.$$

### Система уравнений граничных условий

$$\left\{ \begin{array}{l} U_O(0) = E_{C1} \cdot k_{E1} - I_O(0) \cdot (Z_{O1} + k_{I1}) - I_G(0) \cdot k_{I1} \\ U_G(0) = E_{C1} \cdot k_{E1} - I_O(0) \cdot k_{I1} - I_G(0) \cdot (Z_{G1} + k_{I1}) \\ U_O(l) = E_{C2} \cdot k_{E2} + I_O(l) \cdot (Z_{O2} + k_{I2}) + I_G(l) \cdot k_{I2} \\ U_G(l) = E_{C2} \cdot k_{E2} + I_O(l) \cdot k_{I2} + I_G(l) \cdot (Z_{G2} + k_{I2}) \end{array} \right.$$

$$k_{E1} = \frac{Z_{K1}}{Z_{C1} + Z_{K1}} \quad k_{E2} = \frac{Z_{K2}}{Z_{C2} + Z_{K2}}$$

$$k_{I1} = \frac{Z_{K1} \cdot Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{K1}} \quad k_{I2} = \frac{Z_{K2} \cdot Z_{C2}}{Z_{C2} + Z_{K2}}$$

здесь  $U_O(0)$  и  $U_G(0)$ - напряжение вначале линии, а  $U_O(l)$  и  $U_G(l)$ -в конце линии

Для контроля результатов расчетов была разработана частотная методика экспериментальных исследований в действующих сетях каскада ГЭС. Сформирован автономный генераторно-измерительный комплекс, включающий мобильный генератор с силовыми ключами на IGBT транзисторах с автономным источником питания – бензогенератором GeKo, которые обеспечили независимое генерирование токов в контурах ГЭС и воздушной ЛЭП на частотах, отличающихся от промышленной частоты и ее гармоник. Для измерений использованы бесконтактные датчики тока с разъемной конструкцией и цифровые осциллографы, что позволило выполнить измерения токов в неразъемных элементах заземляющих шин, а также обеспечить безопасность и оперативность подключений.

Для моделирования аварийного тока в действующей сети разработана методика генерирования тока с использованием одной воздушной линии в составе токового контура, выведенной из работы и заземленной в ОРУ на противоположном от генератора конце. Схемы подключения генераторно-измерительного комплекса, на примере экспериментов на ГЭС-5, показаны на рисунке 4.

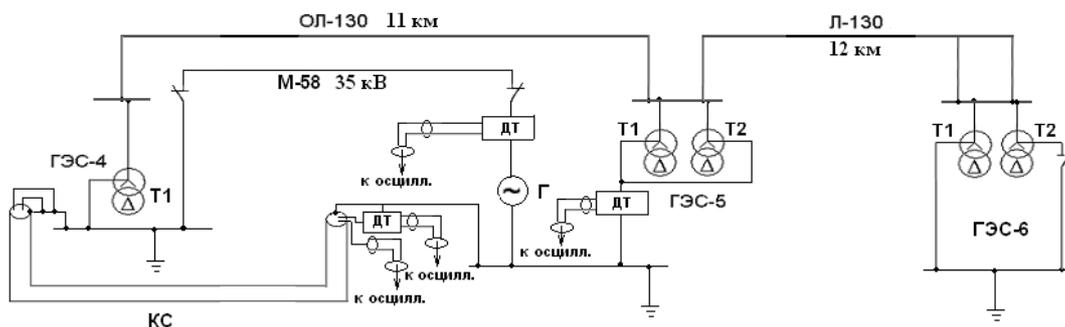


Рисунок 4. Схема экспериментальных исследований на ГЭС-5 КППЭС

Генератор с автономным источником располагался в ОРУ ГЭС-5 и был подключен к проводам линии М-58 35 кВ, заземленной на противоположном конце ГЭС-4. Датчики тока располагались на подключении к линии, на шинах заземления

нейтрали силовых трансформаторах. Исследованы варианты замыкания или обрыва жил по концам кабеля.

Экспериментальные исследования выполнены в диапазоне от 1,2 Гц до 166 Гц, что позволяет с помощью частотных зависимостей контролируемых токов и напряжений и определить значения, соответствующие промышленной частоте.

Такая методика обеспечивает высокую помехозащищенность от действующих электроустановок при относительно небольших генерируемых токах в пределах 8-15А. Наведенные напряжения на изолированной жиле кабельной линии составляли от 10 до 25 В, а токи в короткозамкнутых жилах – от 150 до 200 мА. Для повышения точности регистраций использована функция спектрального преобразования регистрируемого сигнала.

В третьей главе представлены основные результаты численных исследований электромагнитных влияний аварийных токов в высоковольтной сети на проводные подземные коммуникации.

Стадии развития нарушений кабельной линии приведены на рисунке 5.

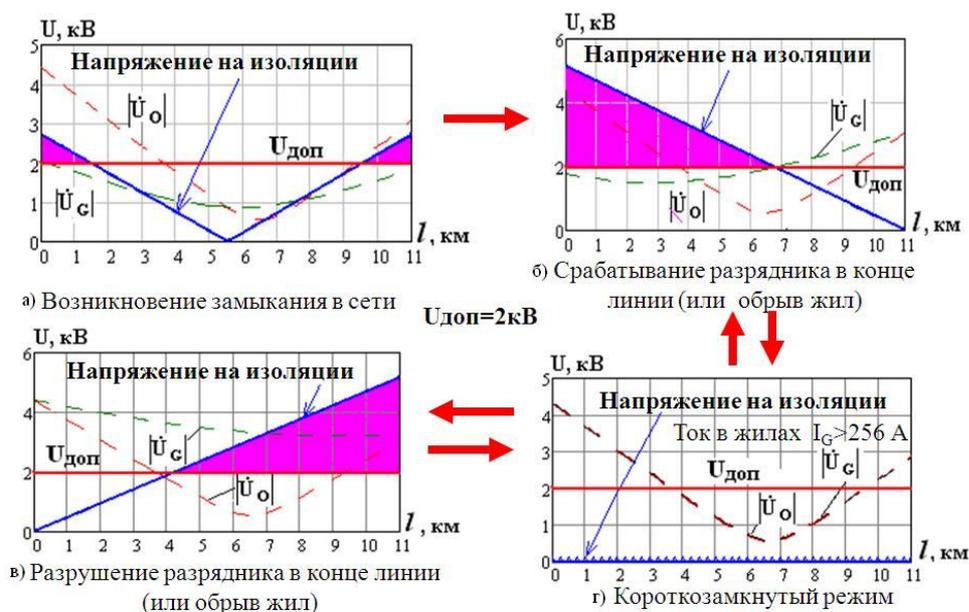


Рисунок 5. Пример развития повреждения кабеля между ГЭС-4 и ГЭС-5 вследствие замыкания в ОРУ ГЭС-5

На первой стадии при возникновении аварийного режима напряжение на изоляции превышает допустимый уровень 2 кВ по концам кабельной линии в пределах 1,5 км (рисунок 5а). На второй стадии происходит срабатывание одного из защитных разрядников, например в конце линии, существенно повышается напряжение в начале линии и на трассе (рисунок 5б). При срабатывании второго разрядника в начале кабеля, напряжение существенно снижается, но увеличивается

ток в короткозамкнутых контурах. В результате термического действия происходит разрушение разрядника или перегорание жилы, например в конце линии (рисунок 5в). Вследствие этого, напряжение в конце линии и на трассе увеличивается до опасных значений (рисунок 5г) и происходит пробой изоляции.

Далее, процессы разрушения жил или концевых устройств и перекрытия изоляции продолжаются до срабатывания защит на ликвидацию нарушения в высоковольтной сети.

Полученные в работе математические модели, позволили сформировать алгоритм исследований электромагнитной совместимости, показанный на рисунке 6.

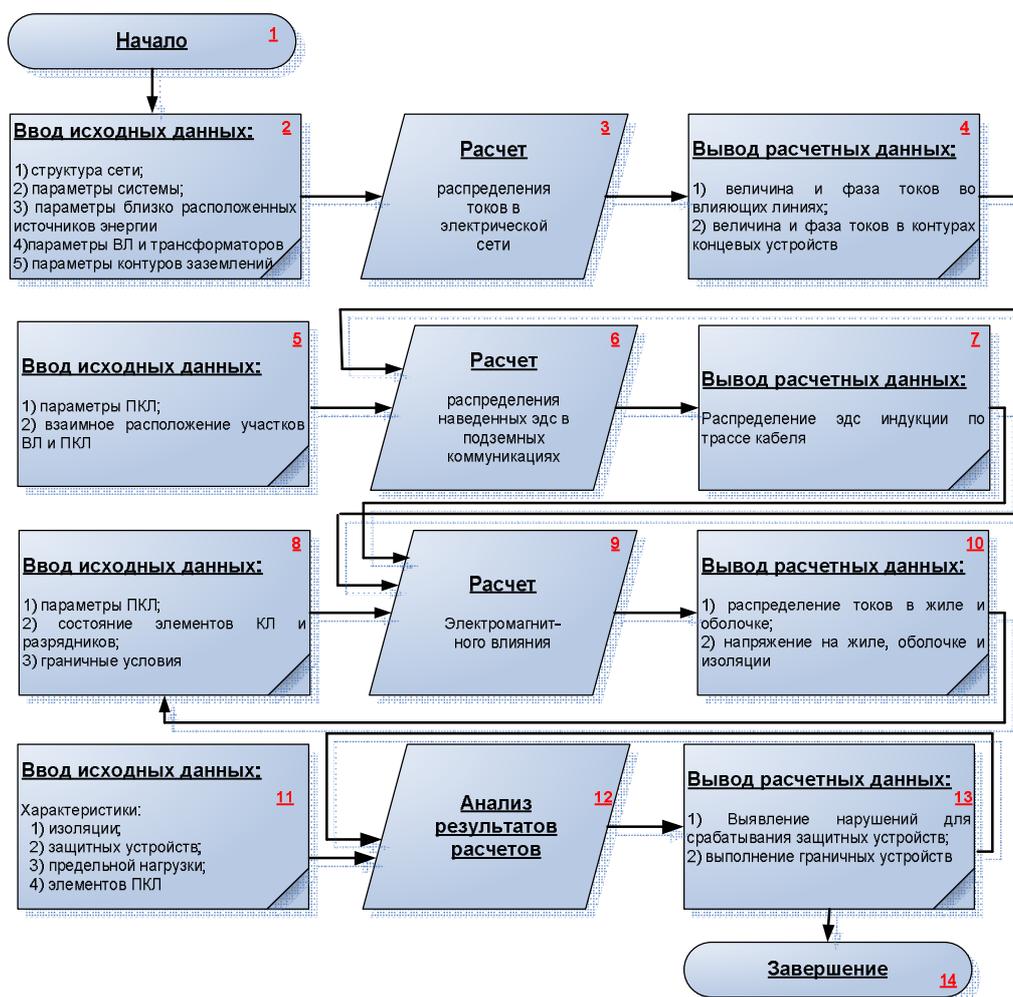


Рисунок 6. Алгоритм исследований электромагнитной совместимости воздушных ЛЭП и подземных линий связи

Описанный комплекс расчетных программ последовательно излагается в диссертационной работе. Все математические результаты и разработанные алгоритмы доведены до стадии численных расчётов и программ в системе Mathcad 14 и на языке Visual Fortran-90 (с использованием библиотеки стандартных программ IMSL).

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований в действующей сети 110 кВ каскада Пазских ГЭС по схеме представленной на рисунке 4. Примеры осциллограммы и спектра тока в заземленной нейтрали трансформатора, при генерировании тока на частоте 41.67 Гц показаны на рисунке 7.

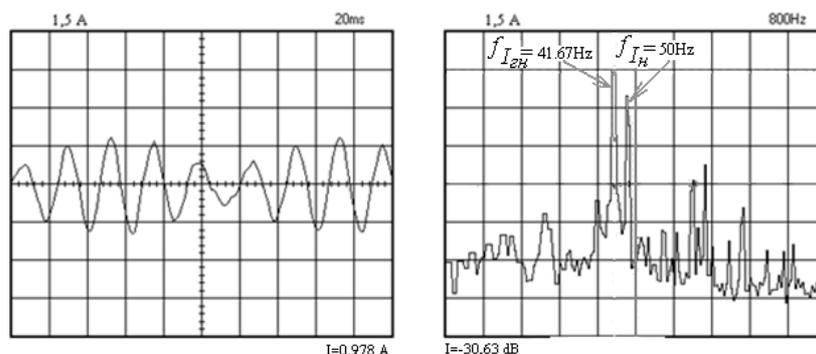


Рисунок 7. Пример осциллограммы и спектра тока в заземленной нейтрали T1 и T2 ГЭС-5 при генерировании тока основной частотой 41,67 Гц

Спектральное представление регистраций позволило четко разделить по величине и по фазе экспериментальный ток  $I_{2H}$ , рабочие токи несимметрии  $I_H$  и помехи промышленной частоты.

Распределения токов при реальном замыкании в сети и в экспериментальных исследованиях не полностью совпадают вследствие необходимости в экспериментах выведения из работы одной из ВЛ. Поэтому для согласования теоретических и экспериментальных исследований расчеты и результаты экспериментов приведены к току в воздушной линии М-58 1 кА. Результаты расчетов наведенного тока и напряжения в кабельной линии приведены (на рисунке 8).

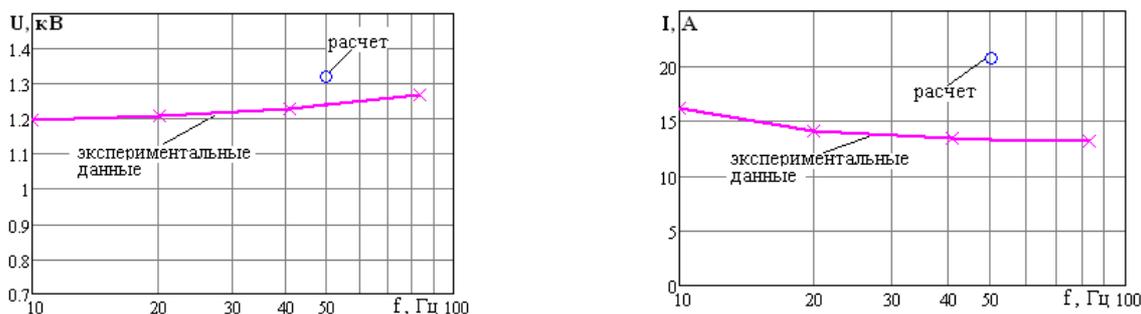


Рисунок 8. Частотная зависимость напряжения на изоляции изолированной жилы и тока в короткозамкнутой жиле

Результаты расчетов и экспериментов в первом приближении согласуются между собой. Расхождения объясняются неравномерным распределением напряжения в пределах контура ГЭС, имеющего большие габариты, неточностью данных о реальном расположении трассы кабельной линии, а также влиянием возможных

дефектов изоляции жил на изменения параметров кабеля. Тем не менее, можно констатировать, что точность расчетов достаточна для принятия решения о совершенствовании защиты кабеля.

С помощью разработанного алгоритма исследований, приведенного выше, выполнены многовариантные расчеты влияния аварийных токов высоковольтной сети на кабельные линии связи Каскада Пазских ГЭС. В результате обобщения расчетов изучен механизм возникновения и развития дефектов и повреждений элементов кабельной линии, схематично показанный на рисунке 9.

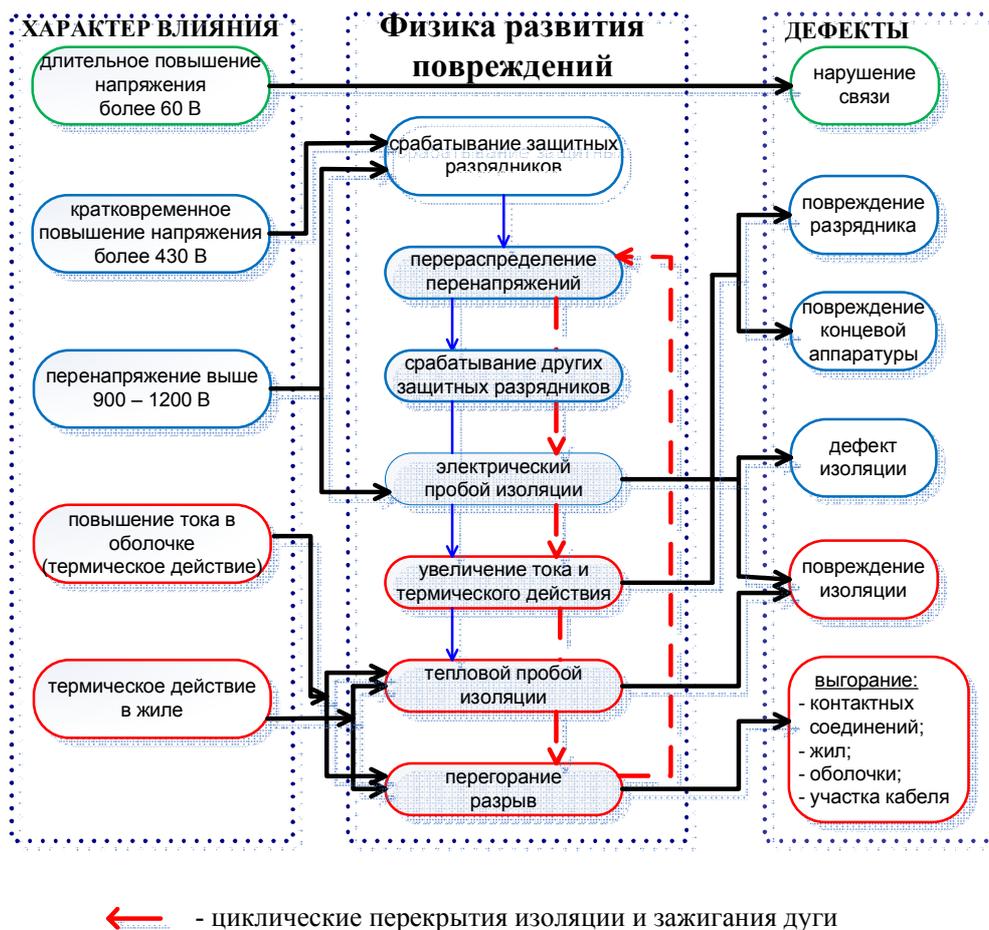


Рисунок 9. Механизм возникновения и развития дефектов и повреждений элементов кабельной линии

Как видно, уровень опасности зависит как от величины электромагнитного воздействия, так и длительности этих влияний, которые ограничены срабатываем защит на ликвидацию аварий. Здесь показаны возможные варианты с повреждением разрядников или концевой аппаратуры, а так же дефекты повреждения изоляции с выгоранием концевых подключений и элементов кабелей.

В пятой главе дана разработка рекомендаций по совершенствованию защиты кабелей связи и аппаратуры от опасных влияний аварийных режимов высоковольтной

сети. Для выбора параметров токоограничивающих элементов, зависимости тока и напряжения были сведены на одном графике (рисунок 10).

Как показано на графике, можно выделить область, в которой ток и напряжение не превышают допустимые уровни. В рассматриваемом случае для линий связи ГЭС Пазского каскада оптимальное значение добавочного сопротивления составило от 5 до 20 Ом.

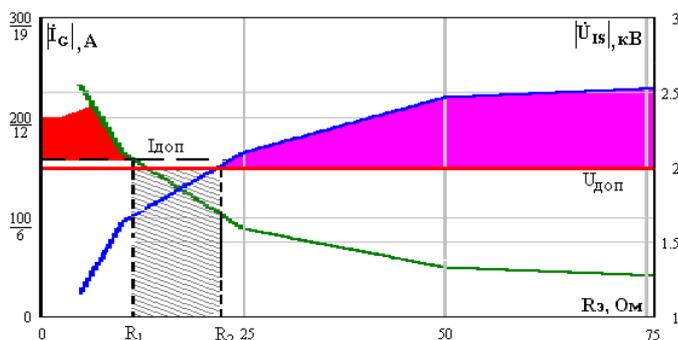
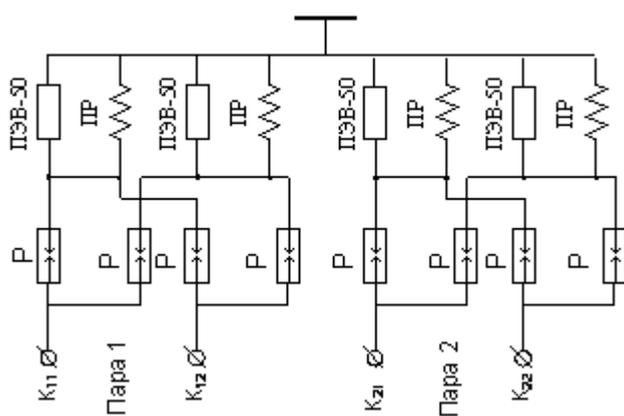


Рисунок 10. Зависимость напряжения на изоляции кабеля и токов на жилах от добавочного сопротивления защитного устройства

Разработанное защитное устройство, макет и схема которого представлены на рисунке 11, изготовлено и испытано в условиях работы на ГЭС Пазского каскада.



а)

б)

Рисунок 11. Схема (а) и макет (б) защитного устройства кабеля связи

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Разработана математическая модель для расчетов распределения аварийных токов в высоковольтной сети с учетом влияния сопротивлений контуров заземлений ГЭС и кабельных линий связи, соединяющих эти ГЭС.
2. На основе решения уравнений электромагнитного поля диполя в воздухе получены аналитические выражения для составляющих компонент

- электрического поля в земле и разработана методика расчета распределения наведенной ЭДС по трассе кабельной линии.
3. Разработана методика расчета распределения токов и напряжений в элементах подземных коммуникаций, для комплексного индуктивного и гальванического влияния аварийного тока в сети и сформирован пакет расчетных программ для исследований электромагнитного влияния высоковольтной сети на подземные линии связи.
  4. Разработана методика экспериментальных исследований с моделированием аварийной ситуации в действующей сети, позволяющая обеспечить безопасность для персонала и измерительного оборудования, частотное разделение экспериментальных и рабочих токов, а также бесконтактные измерения токов в заземляющих проводниках.
  5. Выявлены многоступенчатый механизм развития повреждений кабельных линий связи, связанный с возможным последовательным воздействием перенапряжений на изоляцию кабельной линии и опасных токов, сопровождающих срабатывание защитных разрядников.
  6. Проведены экспериментальные исследования в действующей сети 110 кВ на ГЭС Пазского каскада, результаты которых подтверждают выводы об опасных уровнях электромагнитного влияния, полученные при многовариантных расчетах.
  7. Разработан метод комплексной защиты от перенапряжений и опасных токов, с помощью включения токоограничивающих элементов в цепь защитных разрядников. Параметры токоограничивающих элементов определяются конфигурацией действующей высоковольтной сети и линий связи, а также характеристиками грунта. Создано и практически апробировано защитное устройство для линий связи ГЭС Пазского каскада.

## **Публикации**

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

1. *Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Карпов А.С., Кабеев И.Е.* Проблемы диагностирования контуров электроэнергетических объектов при низкой проводимости грунта. //Технологии ЭМС (электромагнитной совместимости), Издательский дом «Технологии», Москва, 2007. -№4. с. 29-32.

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

1. *Невретдинов Ю. М., Фастий Г.П., Карпов А.С.* Распределение токов коротких замыканий на землю на ГЭС при оценке опасности «выноса» потенциалов. /Сб.

научных трудов. Техничко-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера, Изд. КНЦ РАН, г.Апатиты, 2007. - С.95-100.

2. *Невретдинов Ю.М., Карнов А.С., Кабеев И.Е.* Диагностирование контуров заземления электростанций. /Сб. научных трудов. Техничко-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера, - Изд. КНЦ РАН, г.Апатиты, 2007. - С.86-95.

3. *Невретдинов Ю.М., Карнов А.С., Фастий Г.П.* Совершенствование защиты линий связи от влияния токов в высоковольтной сети. Вестник МГТУ, том 12, №1, 2009. С.65-69.

4. *Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Кабеев И.Е., Карнов А.С.* Особенности распределения токов при проведении экспериментов в действующих распределительных устройствах при низкой проводимости грунта. Сборник докладов IX НТК по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. – С-Петербург, ВИТУ, 2006. с. 146 – 149.