

На правах рукописи

Колобов Виталий Валентинович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И
РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ.**

Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2008

Работа выполнена в центре физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской Академии наук

Научный руководитель:	доктор технических наук Ефимов Борис Васильевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Халилов Фирудин Халилович кандидат технических наук, доцент Веселов Анатолий Евгеньевич
Ведущая организация:	Открытое акционерное общество «Колэнерго» РАО ЕЭС России

Защита состоится «18» апреля 2008 г. в 10 часов в ауд. 325 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 «04» марта 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Попов М.Г.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1. Актуальность темы. Надежность высоковольтных сетей во многом определяется различного рода электромагнитными переходными процессами, которые возникают на отдельных участках и схемах сетей. Одним из факторов, снижающих надежность работы изоляции оборудования высоковольтных подстанций, являются переходные процессы, сопровождающиеся перенапряжениями, возникающими при плановых коммутациях. Одной из таких операций являются коммутации ненагруженных холостых шин подстанций под рабочим напряжением. Факторами, влияющими на изоляцию электрооборудования, являются, во первых, высокая кратность ВЧ перенапряжений, достигающая $(4\div 5)\cdot U_{ф}$. Во-вторых, происходит перегрев изоляции вводов трансформаторов тока и напряжения, который приводит к ее ускоренному старению, деградации и последующему разрушению. В-третьих, распространение ВЧ перенапряжений, индуктированных в цепи релейной защиты, связи, измерений, приводит к нарушению работы этих цепей.

Недостаточная изученность высокочастотных процессов как явления в теории электрических цепей с сосредоточенными и распределёнными параметрами, а также потребность в создании эффективных средств защиты электротехнического оборудования от высокочастотных перенапряжений определяют актуальность, научную новизну и практическую ценность работы.

1.2. Цель работы и задачи исследования. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование высокочастотных и волновых процессов, вызванных коммутацией участков холостых шин на различных подстанциях энергосистем и разработка комплекса мероприятий по их эффективному ограничению.

Для решения поставленной цели в рамках данной диссертационной работы проведены исследования по следующим направлениям:

1. Разработка физико-математической модели развития высокочастотных переходных процессов на шинах подстанции с учетом основных влияющих факторов на частоты, амплитуды и длительности перенапряжений.

2. Составление развернутой схемы замещения подстанции с различными вариантами защиты от перенапряжений, учитывающей волновые процессы в шинах, входные параметры оборудования, нелинейные эффекты в защитных устройствах, поверхностной эффект в земле и проводах.

3. Разработка программных средств для исследования процессов в реальных электрических сетях на предмет опасных уровней возникающих ВЧ колебаний и определения оптимальных способов защиты от них.

4. Обоснование нового способа защиты оборудования подстанций энергосистемы от высокочастотных перенапряжений путем включения в силовые цепи продольного защитного устройства и разработка его физико-математической модели.

5. Анализ эффективности установки предложенного защитного устройства для подстанций класса 330 кВ.

6. Разработка комплекса технических мероприятий, позволяющих внедрить продольное защитное устройство на действующей подстанции.

7. Проведение экспериментальной проверки разработанных программных и технических средств и анализ результатов опытной эксплуатации устройства подавления высокочастотных перенапряжений на одной из ответственных подстанций 330 кВ ОАО "Колэнерго"

1.3. Основные методы научных исследований. В качестве методов исследования приняты экспериментальные и численные. Для расчёта предлагаемой конструкции защитного устройства была выбрана и обоснована его схема замещения, а также создано программное обеспечение моделирующее происходящие переходные процессы. Для подтверждения достоверности расчётных данных была создана экспериментальная модель, показавшая удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчётных данных.

1.4. Научная новизна работы

- Разработаны методики, алгоритмы и программы расчёта высокочастотных перенапряжений в схемах замещения подстанции в линейной и не линейной постановке задачи;
- Предложен новый способ ограничения высокочастотных перенапряжений в виде продольного защитного устройства с вытеснением тока в высокоомный проводник;
- Проведены многовариантные исследования развития перенапряжений с целью оптимизации параметров и конструкции защитного устройства.

1.5. Практическая ценность:

- разработана измерительная система, с помощью которой можно определить амплитуду, частоту и декремент затухания высокочастотных перенапряжений вызванных, коммутациями ненагруженных шин;
- произведены измерения высокочастотных перенапряжений на ряде подстанций ЦЭС ОАО "Колэнерго";

- разработан конструкция и выбраны оптимальные параметры защитного устройства;
- осуществлена опытная эксплуатация устройства продольной защиты от высокочастотных перенапряжений;
- показана высокая эффективность предлагаемой защиты от высокочастотных перенапряжений.

1.6. Достоверность полученных результатов. Для достоверности полученных результатов была проведена установка предложенного защитного устройства на подстанции №204 ЦЭС ОАО «Колэнерго» и измерена его эффективность при плановой коммутации ненагруженных шин. Результаты измерения характеристик переходного процесса показали соответствие с расчётной эффективностью защитного устройства.

1.7. Основные положения выносимые на защиту:

- методика экспериментального моделирования и измерений высокочастотных перенапряжений на оборудовании подстанции при коммутациях ненагруженных шин;
- физико-математические модели продольных защитных устройств различного исполнения;
- физико-математическая модель развития высокочастотных переходных процессов с продольными защитными устройствами и без них;
- результаты разработки и испытаний опытного образца продольного защитного устройства.

1.8. Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные её разделы докладывались и обсуждались на VIII Российской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность» (г. Санкт-Петербург, 2004 г.), а также на технических советах ОАО «Колэнерго».

1.9. Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ.

1.10. Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объём работы составляет 170 страниц, 88 рисунков, 8 таблиц. Список литературы содержит 52 наименования.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении производится краткий анализ современного состояния вопроса и обосновывается актуальность выбранной темы. Показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассматриваются причины возникновения высокочастотных перенапряжений, а также мероприятия по защите оборудования подстанций от высокочастотных перенапряжений, рекомендуемые «Методическими указаниями по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше». Одной из причин возникновения высокочастотных (ВЧ) перенапряжений на оборудовании высоковольтных подстанций является перезарядка емкостей шин распределительных устройств при электрических пробоях промежутков между контактами разъединителей во время их коммутации под рабочим напряжением.

Каждая коммутация сопровождается многократными пробоями промежутка между сходящимися и расходящимися контактами разъединителя. При каждом пробое промежутка в схеме подстанции возникают затухающие колебания с частотой до 1 МГц и более. Число пробоев промежутка за одну коммутацию в зависимости от класса напряжения и схемы распределительного устройства, скорости движения контактов разъединителей и метеоусловий может составлять от десятков до нескольких тысяч. Амплитуда напряжения затухающего колебания за время коммутации достигает $3,5 \cdot U_{\phi м}$ или шестикратного действующего фазного напряжения, что представляет опасность для изоляции высоковольтного оборудования. ВЧ перенапряжения негативно воздействуют на изоляцию измерительных трансформаторов, элементы настройки высокочастотных заградителей связи, на вторичные цепи контроля и управления, цепи питания электропривода разъединителей, могут вызывать многократные срабатывания вентильных разрядников.

Электрический пробой межконтактного промежутка разъединителя возникает каждый раз, когда его электрическая прочность U_{np} оказывается меньше разности потенциалов на контактах $U_{np} < E_n - E_x$ (рис.1). После пробоя промежутка происходит выравнивание потенциалов на емкостях шин C_n и C_x , сопровождаемое высокочастотным переходным процессом (U_1 на рис.2), первая амплитуда которого соответствует максимуму ВЧ перенапряжений. Высоковольтная составляющая переходного напряжения на холостой шине

можно представить зависимостью $U_1 = -(E - E_x) e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot \cos(\omega t)$. Максимальную интенсивность переходные процессы имеют при коммутации отключения

разъединителя при таких промежутках между контактами, когда пробои следуют через половину периода частоты 50 Гц в максимумы фазного напряжения на питающих шинах: $E_n = U_{фм}$. При этом перенапряжения определяются соотношением емкостей C_n и C_x , а также величиной остаточного потенциала E_x на холостой шине в момент пробоя межконтактного промежутка разъединителя. Таким образом, наибольшее значение ВЧ перенапряжения будет при последнем пробое межконтактного промежутка при разведении ножей разъединителя.

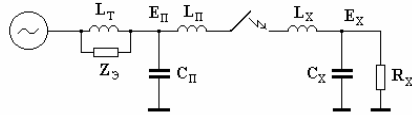


Рис. 1. Схема замещения при коммутации разъединителем ненагруженных шин.

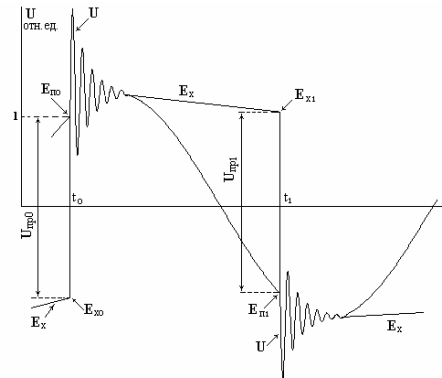


Рис. 2. Пробой межконтактного промежутка разъединителя при коммутации ненагруженных шин.

Во второй главе обосновывается разработка специальной измерительной аппаратуры, а также предлагается её реализация.

Цифровые измерительные приборы обладают рядом достоинств: удобство и объективность отсчёта и регистрации измеряемой величины, широкий диапазон измерения при высокой разрешающей способности и точности, удобство и высокая помехоустойчивость передачи измерительной информации в управляющую вычислительную машину. Появление малогабаритных и достаточно мощных ПЭВМ привело к появлению измерительно-вычислительных комплексов, сочетающих функции средств измерений и вычислительных устройств. В то же время, для связи измерительной части с ПЭВМ, в условиях сложной электромагнитной обстановки, все большее распространение получают волоконно-оптические линии связи. Они характеризуется: высокой скоростью передачи информации; низкими оптическими потерями в световодах, что обеспечивает возможность передачи информации на большие расстояния; невосприимчивостью к электромагнитным помехам; широкой полосой пропускания передаваемых

сигналов; отсутствием электромагнитных излучений в окружающее пространство; высокой диэлектрической изоляцией, обеспечивающей идеальную электрическую развязку между соединяемыми устройствами; малыми размерами и массой волоконно-оптических кабелей.

Основываясь на вышеперечисленных положениях, была разработана мобильная универсальная измерительная система, предназначенная для проведения широкого круга измерений в условиях действующих объектов энергетики (подстанции, линии электропередачи). В комплекте с различными входными устройствами (датчиками), система позволяет проводить измерение и осциллографирование электрических величин, (импульсных и периодических токов и напряжений) в широком амплитудном и временном диапазоне.

В третьей главе рассматривается методика измерения высокочастотных перенапряжений, а также приводятся осциллограммы перенапряжений на подстанциях класса 330 кВ ОАО «Колэнерго».

ВЧ перенапряжения на подстанциях могут быть измерены путем размещения делителей напряжения на вводах аппаратов и последующего осциллографирования ВЧ перенапряжений при пробоях между ножами разъединителей. Максимальные величины перенапряжений будут иметь место при разведении ножей и последнем пробое промежутка при максимальном расстоянии между ножами. Очевидно, что такие эксперименты могут носить единичный характер на отдельных подстанциях при условии соблюдения повышенных мер безопасности.

В связи с выше изложенным была поставлена задача разработки безопасной методики измерения ВЧП. Для апробации методики была выбрана подстанция ПС №204. Ее однолинейная схема оборудования и шин 330 кВ приведена на рис. 3.

В эксплуатации полное отключение подстанции (с выводом обоих АТ) практически не бывает. В связи с этим предложен другой способ моделирования перенапряжений при частичном отключении подстанции, связанном с поочередным выводом АТ в ремонт и отключении питания от КАЭС. Емкость, равная сумме емкостей на землю шин и аппаратов, размещенных между выключателем и разъединителем, заменяется эквивалентной сосредоточенной емкостью, разряжающейся через искровой разрядник на систему в месте подключения разъединителя к системе шин. Схема выполнения такого опыта на типовой подстанции № 204 приведена на рис.4. Измерения переходных процессов можно выполнить во всех точках системы шин подстанции, не находящихся под напряжением, и на вводах отключенного АТ (точки 1, 2, 2а, 3 рис.4), при этом по осциллограммам можно оценить деформацию высокочастотного импульса и его затухание по мере удаления от места коммутации.

Высоковольтный ввод ТТ-330 кВ с его измерительной емкостной обкладкой (ПИН), используемой при измерениях тангенса угла потерь масляной изоляции ввода, представляет собой емкостной делитель $C_1 - C_2$ (рис.4). Значения емкостей обкладок ввода ТТ - 330 кВ составляют: $C_1 = 550 \div 750$ пФ, $C_2 = 25000 \div 28000$ пФ. Следовательно через измерительные обкладки могут быть измерены ВЧ перенапряжения на шинах у трансформатора тока. При этом можно выполнить подбор параметров измерительной схемы таким образом, чтобы искажения импульса было минимальным. Измеряя ВЧ перенапряжения через измерительные обкладки при производстве реальных коммутаций ненагруженных шин под рабочим напряжением можно определить параметры ВЧ перенапряжения, являющихся наиболее критичными с точки зрения повреждения изоляции ТТ. Серия экспериментов, включающих моделирование ВЧ перенапряжений и замеров при коммутациях шин под рабочим напряжением, была выполнена на ряде подстанций энергосистемы «Колэнерго».

Сравнение результатов измерения на шине вблизи ТТ и через его измерительные на разных фазах (рис.5), показали, что измерения через измерительные обкладки ТТ-330 кВ можно считать корректными в пределах необходимой точности.

Измерение ВЧ перенапряжения, выполненного при коммутации ножами разъединителя под рабочим напряжением (рис.6), позволяют дать оценку как об амплитуде перенапряжения, так и интеграла действия.

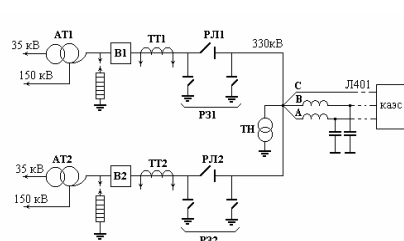


Рис. 3. Однолинейная схема подстанции № 204.

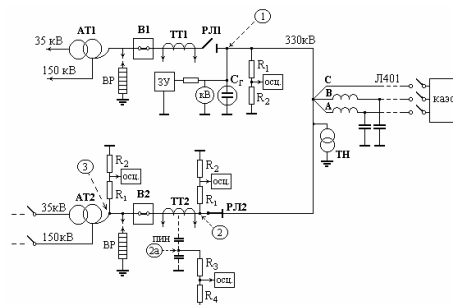


Рис. 4. Схема измерений ВЧ перенапряжений при моделировании коммутаций холостых шин.

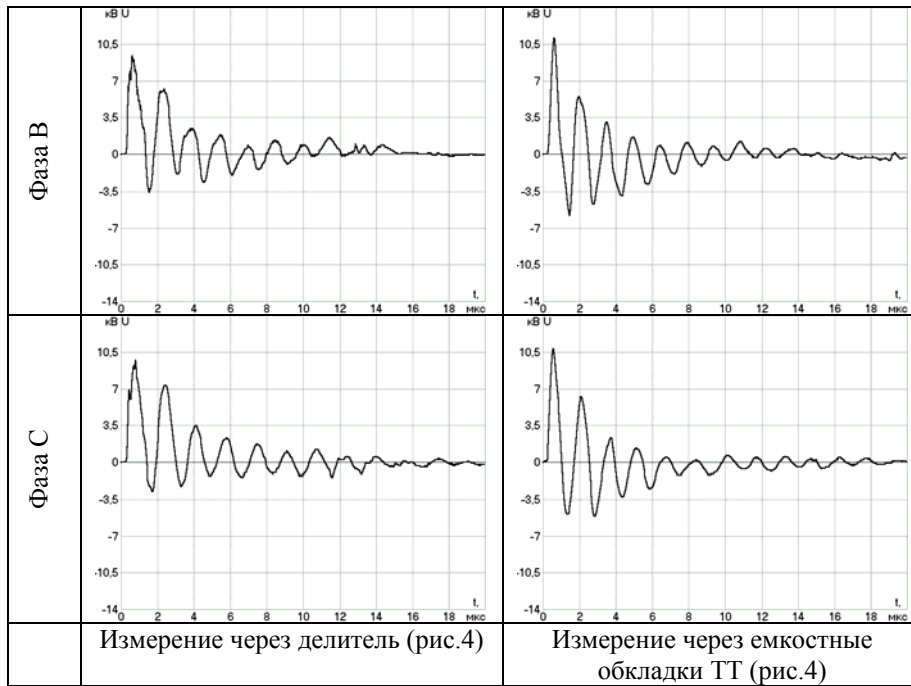


Рис. 5. Осциллограммы в различных точках измерения.

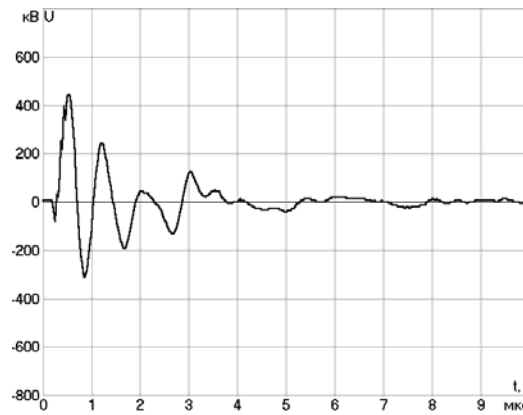


Рис. 6. Осциллограмма ВЧ перенапряжения выполненного через ПИН ТТ-330 кВ при коммутации ненагруженных шин под рабочим напряжением.

В четвёртой главе Рассматривается устройство продольной защиты, позволяющее уменьшить ВЧ перенапряжения, и строится схема замещения типичной подстанции с защитным устройством, позволяющая выполнять расчёт ВЧ перенапряжений при выборе оптимальных параметров продольного защитного устройства (ПЗУ).

Физически реализация заданной частотной характеристики ПЗУ основана на вытеснении тока высокой частоты из силовой шины в резистивный элемент устройства, где должна происходить диссипация энергии ВЧ колебаний. В связи с этим предложена и рассмотрена коаксиальная система, включающая в себя центральный провод, промежуточный слой и высокоомную оболочку, конструктивные и электрические параметры которых варьируются при производстве расчетов.

Коммутируемый участок замещается схемой из элементов с сосредоточенными параметрами (рис. 7). Емкость C_1 является суммарной емкостью части выключателя, разъединителя и ТТ, также ошиновки подстанции между выключателем и ТТ. В выполненных расчетах величина C_1 принята равной 1 нФ на фазу. Индуктивность эквивалентной петли тока по ошиновке с возвратом по земле (L_1) является трудно рассчитываемым параметром. По приближенной оценке эта величина находится в пределах $(20\div 50)\cdot 10^{-6}$ Гн. Еще более неопределенным является оценка активного сопротивления, эквивалентирующего потери в контуре и искре после пробоя промежутка между ножами разъединителя. Положим R_1 на порядок меньше волнового сопротивления шин, в пределах $(1\div 50)$ Ом. При этих условиях характеристическое сопротивление контура лежит в пределах

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = (140\div 235) \text{ Ом. При любых сочетаниях заданных параметров}$$

переходный процесс при коммутации будет колебательным. Однако при нагрузке на волновое сопротивление шин остальной подстанции режим разряда емкости становится аperiodическим, а процесс формирования высокочастотных колебаний полностью определяется многократным отражением и преломлением волн в ошиновке.

При максимальной простоте схемы она позволяет моделировать основные расчетные случаи при анализе физики развития высокочастотных перенапряжений, а именно: короткое замыкание в конце линии, холостой ход, случай согласованной нагрузки, различные режимы накопления и последующей отдачи энергии емкостями оборудования. Для расчёта эффективности ПЗУ были выбраны следующие параметры, соответствующие параметрам ошиновки подстанции 330 кВ и конструктивно допустимые параметры защитного устройства:

- удельная проводимость провода равна средней для алюминиевых сплавов $\gamma_1=2.6 \cdot 10^7$ (Ом·м)⁻¹. Радиус провода $r_1=12$ мм;
- промежуточный слой защитного устройства представляет из себя ферритовый слой с внутренним и внешним радиусами 12 мм и 17 мм и $\mu=2500$;
- Внешний проводник (оболочка) надет на ферриты, имеет внутренний радиус $r_2=17$ мм и толщину 1 мм ($r_3=18$ мм);
- Длина системы принята равной 10 м.

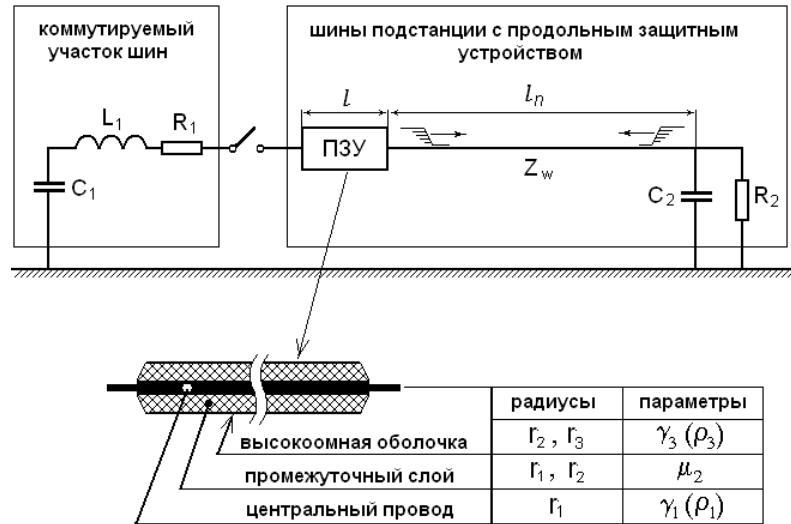


Рис. 7. Упрощённая схема замещения подстанции с продольным защитным устройством (ПЗУ).

На рис. 8 в форме таблицы представлены результаты расчетов с различными удельными сопротивлениями оболочки, которые подобраны так, чтобы ее сопротивление постоянному току на длине 10 м практически точно равнялось трем значениям: 125 Ом, 500 Ом и 2000 Ом. Тогда удельные проводимости оболочки:

- $\gamma_3=728$ 1/Ом·м для сопротивления оболочки $R_{nm}=12.5$ Ом/м;
- $\gamma_3=182$ 1/Ом·м для сопротивления оболочки $R_{nm}=50.0$ Ом/м;
- $\gamma_3=45.5$ 1/Ом·м для сопротивления оболочки $R_{nm}=200.0$ Ом/м;

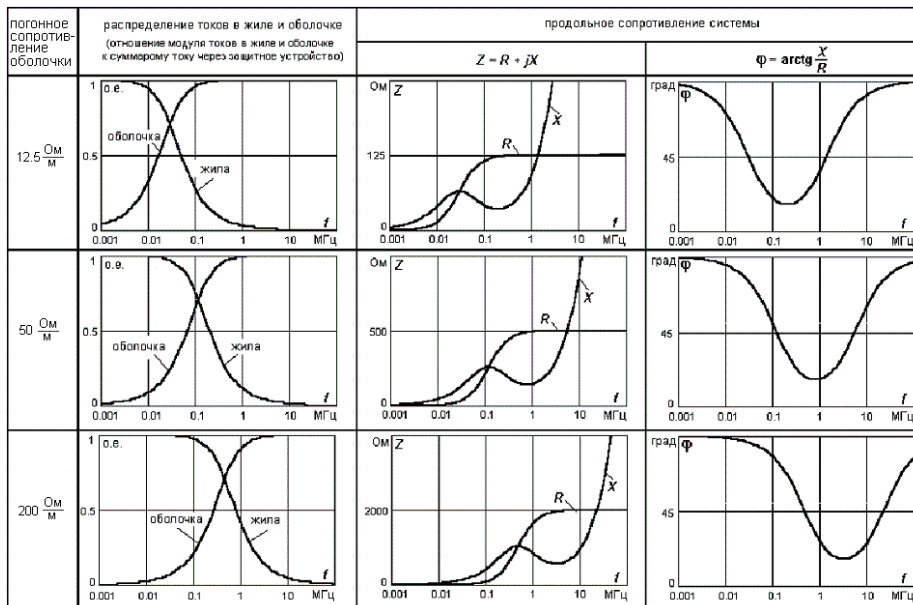


Рис. 8. Зависимости от частоты электрических характеристик защитных устройств при активном сопротивлении оболочки по постоянному току 12.5 Ом/м, 50.0 Ом/м и 200 Ом/м ($\mu_2=1000\mu_0$; $l=10$ м)

Зависимости во всех строках таблицы полностью подобны друг другу. Однако по мере роста сопротивления оболочки постоянному току они сдвигаются в сторону больших частот – возрастает доля высокочастотного тока, проходящая сквозь защитное устройство. С этой точки зрения наименьшее сопротивление внешнего проводника $R = 125$ Ом наиболее эффективно, поскольку высокочастотные потери в оболочке охватывает больший частотный диапазон. Тем не менее это сопротивление недостаточно для эффективного ограничения перенапряжений. При заданной ограниченной длине устройства в отношении соотношения параметров мы имеем задачу на нахождение оптимума. Для указанной заданной длины наибольшее гашение ВЧ перенапряжений достигается при сопротивлении оболочки в интервале 400-500 Ом.

Модель для расчета и системы уравнений для расчетов ПЗУ и перенапряжений приведены на рис 9, 10.

$$k_1 \approx \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho_1}} \quad k_3 \approx \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho_3}}$$

$$Z_1 = \frac{k_1\rho_1}{2\pi r_1} \cdot \text{cth}(0.777 \cdot k_1 r_1) + \frac{0.356\rho_1}{\pi \cdot r_1^2}$$

$$Z_2 = \frac{j\omega\mu_2}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$Z_3 = \frac{\rho_3 k_3}{2\pi \cdot r_2} \text{cth} k_3 (r_3 - r_2)$$

$$Z_4 = \frac{\rho_3 k_3}{2\pi \cdot \sqrt{r_2 r_3}} \frac{1}{\text{sh} k_3 (r_3 - r_2)}$$

$$Z_5 = \frac{\rho_3 k_3}{2\pi \cdot r_3} \text{cth} k_3 (r_3 - r_2)$$

$$Z_6 = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_3}$$

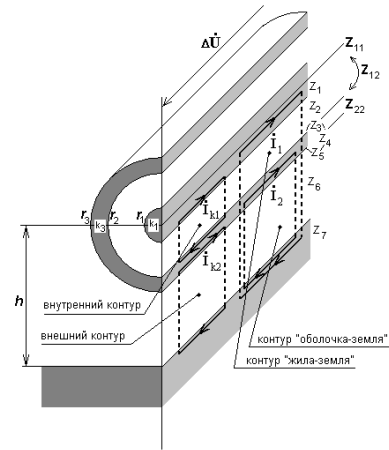
$$Z_7 = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2\lambda h}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega\mu_0}{\rho_{sp}}}} \cdot d\lambda$$

$$\begin{vmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \Delta U \\ \Delta U \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta U \\ \Delta U \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (Y_{11} + Y_{12})\Delta U \\ (Y_{21} + Y_{22})\Delta U \end{vmatrix}$$

$$I = (Y_{11} + Y_{12} + Y_{21} + Y_{22})\Delta U = Y_\Sigma \cdot \Delta U$$

$$Z = R + jX = \frac{1}{Y_{11} + 2Y_{12} + Y_{22}}$$



$$Z_{11} = Z_1 + Z_2 + (Z_3 - Z_4) + (Z_5 - Z_4) + Z_6 + Z_7$$

$$Z_{12} = Z_{21} = (Z_5 - Z_4) + Z_6 + Z_7$$

$$Z_{22} = Z_5 + Z_6 + Z_7$$

Рис. 9. Модель для расчета параметров ПЗУ.

На рис.11 и рис.12 приведены расчётные напряжения без защитного устройства и с ПЗУ длиной 10 м и суммарным сопротивлением внешнего проводника 500 Ом. Весь переходный процесс сводится к одиночному всплеску напряжения не превышающего по амплитуде зарядного напряжения на емкости коммутируемого участка. Можно считать, что высокочастотные перенапряжения полностью подавлены.

В связи с нелинейностью характеристики ферромагнитного материала была предложена схема замещения, решаемая методом бегущих волн.

$$C_a = \frac{2\pi \cdot \varepsilon}{\ln \frac{2h_a}{r_a}} \quad Y_w = j\omega \cdot C_a \quad L_a = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{2h_a}{r_a} \quad Z_w = j\omega L_a + Z^{(n)} + Z^{(3)}$$

$$Z^{(n)} = \frac{1+j}{2\pi \cdot r_a} \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu_0\rho_1}{2}} \quad Z^{(3)} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2\lambda h_a}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \frac{j\omega\mu_0}{\rho_{sp}}}} \cdot d\lambda$$

$$Z_a = \sqrt{\frac{Z_w}{Y_w}} = \operatorname{Re} Z_a - j|\operatorname{Im} Z_a| \quad \gamma_a = \sqrt{Z_w \cdot Y_w} = \alpha + j\beta$$

$$U_1 = \operatorname{ch}(\gamma \cdot l_a) \cdot U_2 + Z_a \operatorname{sh}(\gamma \cdot l_a) \cdot I_2 \quad I_2 = \left(\frac{1}{R_2} + j\omega \cdot C_2\right) \cdot U_2$$

$$I_1 = \frac{\operatorname{sh}(\gamma \cdot l_a)}{Z_a} \cdot U_2 + \operatorname{ch}(\gamma \cdot l_a) \cdot I_2$$

$$Z_{BX} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\operatorname{ch}(\gamma \cdot l_a) + Z_a \operatorname{sh}(\gamma \cdot l_a) \cdot \left(\frac{1}{R_2} + j\omega \cdot C_2\right)}{\frac{\operatorname{sh}(\gamma \cdot l_a)}{Z_a} + \operatorname{ch}(\gamma \cdot l_a) \cdot \left(\frac{1}{R_2} + j\omega \cdot C_2\right)}$$

$$Z_3 = R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + Z + Z_{BX}$$

$$I_1 = \frac{U_n}{Z_3} \quad U_{C1} = \frac{I_1}{j\omega \cdot C_1} + U_n$$

$$u(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\operatorname{Re} U(j\omega)}{\omega} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega = -\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\operatorname{Im} U(j\omega)}{\omega} \cdot \cos \omega t \cdot d\omega$$

Рис. 10. Система уравнений для расчета перенапряжений.

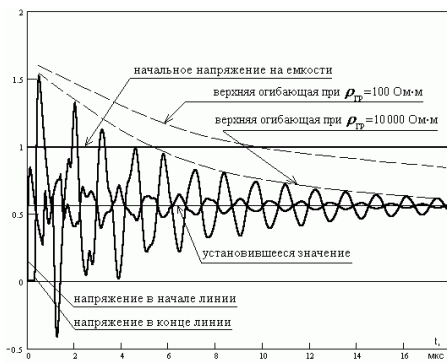


Рис. 11. Напряжения в функции времени без установки защитного устройства.



Рис. 12. Напряжения в функции времени при установке защитного устройства длиной 10 м и суммарным сопротивлением внешнего проводника 500 Ом.

Схема замещения коаксиальной системы ПЗУ приведена на рис. 13. В схеме параметры жилы R_1, L_1 и параметры оболочки R_2, L_2 являются частотно независимыми. Вычисления частотным методом показали, что потерями в грунте можно пренебречь. На этом же рисунке приведены напряжения в начале и в конце линии рассчитанные по точным формулам для коаксиальной системы и по упрощённой RL цепи, в которой пренебрегли взаимной индукцией между контурами оболочка-земля и жилы земля. Из графика видно, что взаимоиנדукция в коаксиальной системе не оказывает большого влияния и ей можно пренебречь. Как следствие можно перейти от коаксиальной системы к конструкции из двух проводников на которые одеты ферритовые кольца и сопротивления, расположенного между этими проводниками (расщеплённая система). Такая система может быть использована в шинах с расщепленным проводом.

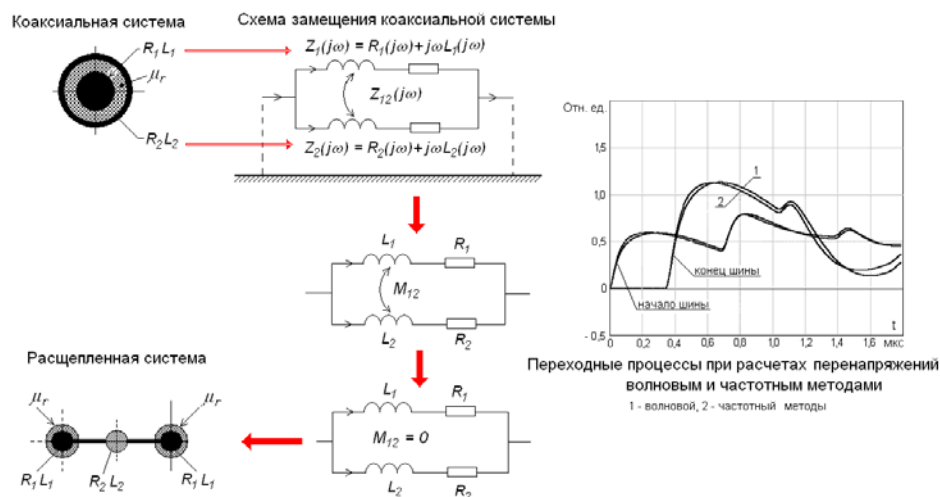


Рис. 13. Схема замещения коаксиальной системы и обоснование перехода к RL цепи без учёта взаимной индукции между жилой и оболочкой.

На рис. 14 приведены напряжения, рассчитанные частотным методом, а также методом бегущих волн без учёта и с учётом нелинейных характеристик ферритов.

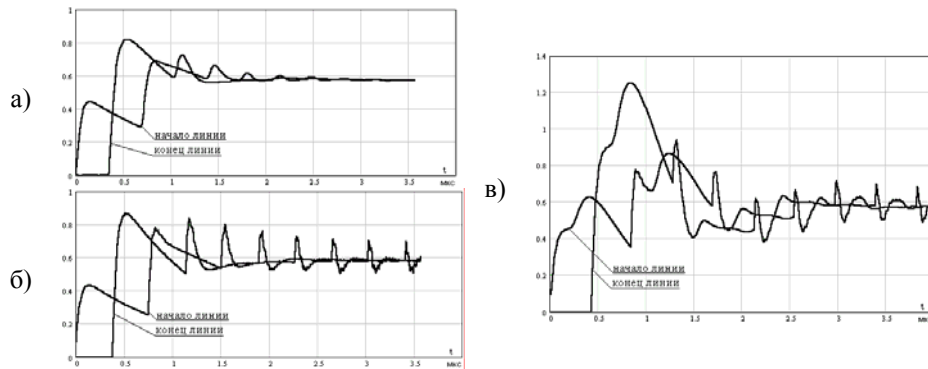


Рис. 14. Сравнение результатов расчётов частотным методом (а), методом бегущих волн (б) в линейной постановке задачи и методом бегущих волн с учётом нелинейных характеристик ферритов (в).

На рис. 15 приведены токи через разъединитель с продольным защитным устройством и без него. Из графика видно, что установка защитного устройства кардинально влияет на результат. Колебания тока превращаются в короткий импульс. Расчёты при отсутствии и при наличии оптимального защитного устройства даже с учетом быстрого насыщения ферритов дают снижение интеграла действия в 5 раз. При ее установке активные потери в изоляции трансформатора тока снижаются на порядок.

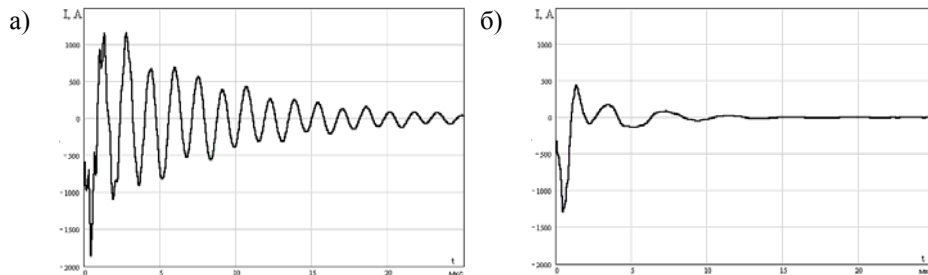


Рис. 15. Суммарный ток через разъединитель при отсутствии защиты (а) и с защитным устройством длиной 10 м (б).

Здесь дадим следующую интегральную оценку. В физике существует понятие интеграла действия $W = \int_0^{t_{\text{кон}}} i^2(t) \cdot dt$, где $t_{\text{кон}}$ - время условного окончания переходного процесса.

При некотором постоянном, активном сопротивлении R , по которому протекает ток $i(t)$, произведение $W \cdot R$ дает потери энергии в этом сопротивлении за весь переходный процесс. Расчеты при отсутствии и при наличии оптимального защитного устройства дают снижение интеграла действия в 5 раз. Это, в известной мере условно, численно характеризует эффективность защиты. При ее установке активные потери в изоляции ТТ снижаются на порядок.

В пятой главе приводятся результаты экспериментального определения эффективности защитного устройства в лабораторных условиях, а также приводится расчёт удельных механических нагрузок на ПЗУ.

Модель продольного защитного устройства была испытана в лабораторных условиях. На рис. 16 представлена схема лабораторного стенда, на котором выполнялись исследования устройства защиты.

Конструкция модели представляла собой фрагмент устройства, которое в дальнейшем испытывалось на подстанции 330 кВ. Масштабировалась только длина устройства и, соответственно, уровень напряжения. На расщепленный провод АС-300 были надеты ферритовые кольца с относительной магнитной проницаемостью 2500 на длине 3,3 метра. Емкость генератора импульсных напряжений примерно соответствовала емкости ошиновки под напряжением (12,5 нФ), нагрузочная емкость соответствовала суммарной емкости оборудования и шин после разъединителя (2000 пФ). Для выбора оптимального гасящего сопротивления его величина варьировалась в широких пределах. Уровень напряжения ГИН составлял около 112 кВ, что примерно составляло третью часть фазного амплитудного значения сети 330 кВ. Модель позволяла генерировать ток при отсутствии защитного устройства.

На рисунках 17 и 18 представлены осциллограммы токов без защитного устройства и при его установке. Измерения подтвердили расчётную эффективность устройства. Интеграл действия снизился практически в 10 раз, амплитуда первой полуволны ВЧ перенапряжения - на 40 %.



Рис. 16. Схема испытательного стенда. $U_{\text{гин}} = 112 \text{ кВ}$.

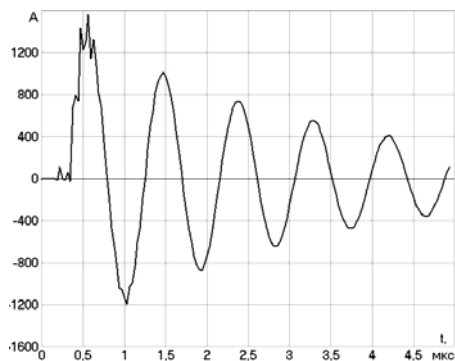


Рис. 17. Ток без защитного устройства.

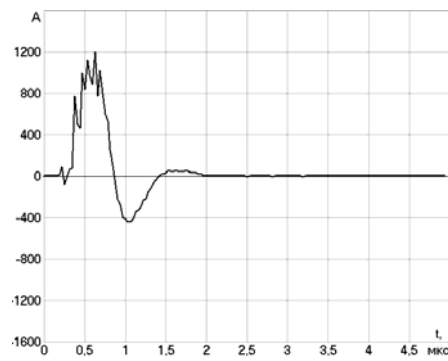


Рис. 18. Ток с защитным устройством при $R = 96 \text{ Ом}$.

На основе вычислений и лабораторных опытов была разработана конструкция опытного устройства, которая приведена на рис. 19. Опыт показал, что нет необходимости выполнять резисторы в качестве коаксиальной оболочки и конструктивно они могут быть вынесены в отдельное устройство, что намного упростило конструкцию защитного устройства.

Опытная конструкция устройства была испытана на подстанции 330 кВ №204 «Колэнерго». Устройство было установлено в одной фазе. С целью снижения механических нагрузок на опоры разъединителей устройство было фрагментировано на две составляющих, размещенных до и после разъединителя, как показано на рис. 20.

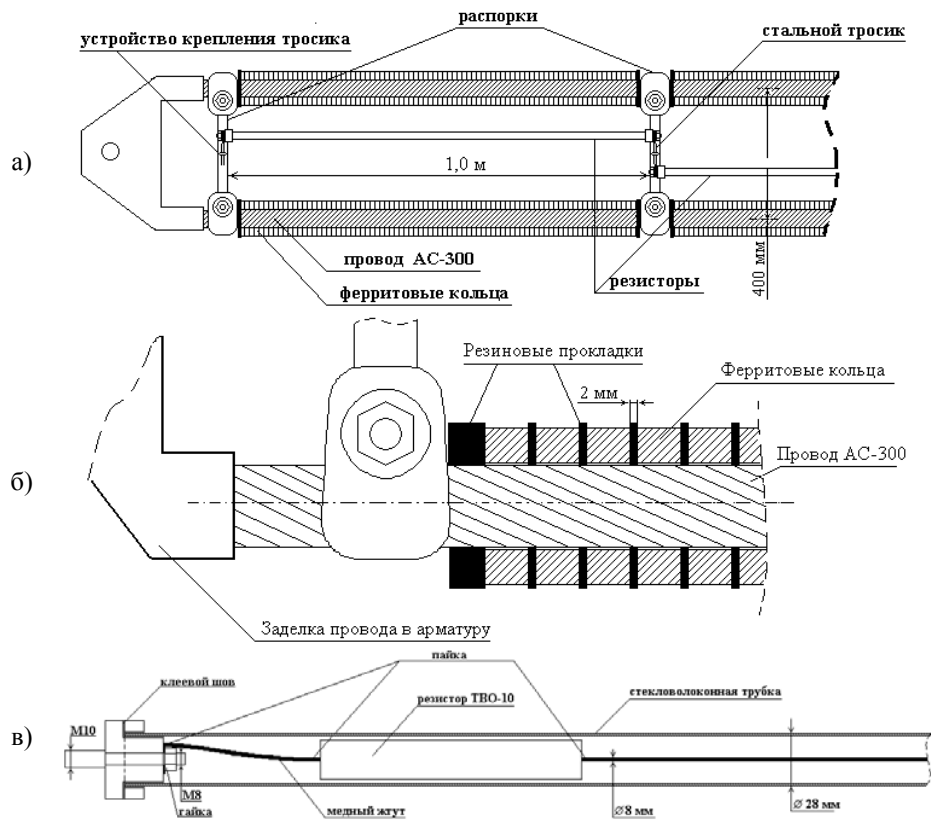


Рис. 19. Общая конструкция продольного защитного устройства (а), размещение ферритовых колец на проводе АС-300 (б) и конструкция резистора (в).

Испытания устройства дали положительный результат. Измерения высокочастотных перенапряжений на измерительных обкладках трансформатора тока показали, что снижение уровня ВЧ перенапряжений оказался близким к расчетным значениям. На конструкцию защитного устройства получен патент.

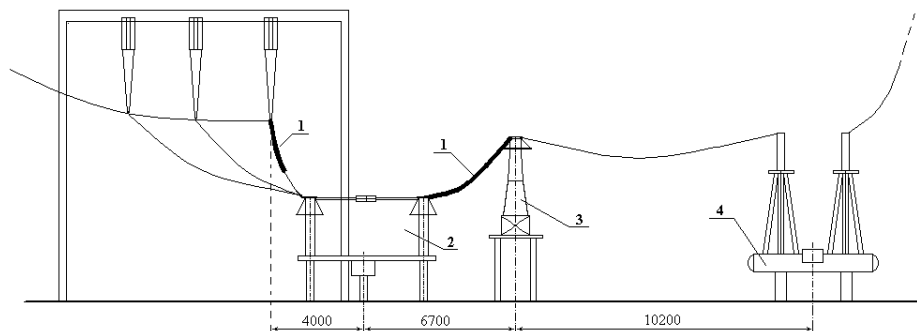


Рис. 20. Место установки защитного устройства. 1- защитное устройство, 2- разъединитель, 3 - трансформатор тока, 4 – выключатель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По диссертации можно сделать следующие выводы:

1. Разработана измерительная аппаратура для регистрации высокочастотных перенапряжений на действующих подстанциях с частотой дискретизации до 100 МГц (шаг по времени 10 нс). Между блоками измерения и регистрации выполнена полная гальваническая развязка, обеспечившая высокую помехоустойчивость измерений и исключение влияние паразитных параметров блока аппаратуры на результаты измерений.

2. В диссертации впервые дано непосредственное сопоставление экспериментальных и теоретических данных по амплитудам перенапряжений в различных точках подстанции. Это сопоставление показало удовлетворительную сходимость опытов и расчетов. Одновременно, заметное расхождение в формах кривых требует развития математических моделей и исследования факторов возможного искажения реальной картины при регистрации колебаний в действующей высоковольтной сети.

3. Показано, что проникновение магнитного поля в грунт и связанные с этим увеличение погонной индуктивности шин и потери, внесенные в контур шина-земля, существенно уточняют картину развития перенапряжений в схемах подстанций без дополнительных защитных устройств. На примере схемы замещения типовой подстанции определены характерные спектры собственных частот колебаний и оценены затухания на этих частотах.

4. В качестве основной меры по подавлению колебаний в работе выбрано продольное активно-индуктивное защитное устройство. Рассмотрение эффективности такого устройства начато с коаксиальной системы при

заполнении слоя между внутренним и внешним проводником материалом с повышенной магнитной проницаемостью. На низких частотах, в том числе и на рабочей частоте сети, весь ток течет по внутреннему проводнику, в качестве которого используется обычный сталеалюминевый провод подстанции. На частотах в сотни килогерц, характерных для рассматриваемого вида коммутаций, за счет поверхностного эффекта ток вытесняется во внешний проводник. В настоящей работе показано, что существует диапазон погонных активных сопротивлений внешнего проводника, в котором обеспечивается максимальное затухание переходного процесса. Для длины защитного устройства 10 м оптимальное значение суммарного сопротивления внешнего проводника приблизительно соответствует волновому сопротивлению шин. При сопротивлении ниже этого диапазона потери в защитном устройстве недостаточны для эффективного ограничения перенапряжений. При слишком большом активном сопротивлении вытеснение тока происходит на частотах, превышающих основную частоту переходного процесса. Защитные функции устройства также ослабляются.

5. Специальное исследование, выполненное в рамках настоящей работы, показало, что с достаточной степенью точности исходные частотнозависимые параметры защитного устройства можно моделировать простейшей схемой из двух параллельных RL-цепочек с постоянными параметрами. Предложен способ расчета параметров этих цепочек. Показано, что в расчетах взаимной индуктивностью между внутренним и внешним проводником можно пренебречь. Эти результаты приводят к выводу о том, что теоретически наиболее эффективная коаксиальная система для вытеснения тока в проводник с большим сопротивлением может быть заменена отдельными параллельными проводами с малым сопротивлением, но с большой погонной индуктивностью, а также с большим сопротивлением и с малой индуктивностью.

6. Рассмотрено влияние насыщения ферромагнитного материала, обеспечивающего большую индуктивность упомянутых выше проводов. На примере расчета токов в коммутируемом участке шин показано, что, несмотря на достаточно быстрое насыщение ферритов при росте тока в основных проводах, амплитуды высокочастотных токов и особенно длительности их существования резко ограничиваются при установке предлагаемой продольной активно-индуктивной защиты.

7. Предложена идея практической реализации такой системы на подстанциях класса напряжения 330 кВ. На устройство продольной защиты получен патент.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Колобов В.В., Ефимов Б.В., Гуменова Н.И. Моделирование высокочастотных процессов в схемах замещения подстанций с учетом влияния продольных защитных устройств./ Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2007, №4-1 с. 206-211.
2. Ефимов Б.В., Данилин А.Н., Колобов В.В. Методика и результаты измерений локальных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций.// Технологии ЭМС, №4 2007. - С 12-15.
3. Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Ограничение перенапряжений на подстанциях при коммутациях разъединителями./ Апатиты, 2007 ISBN 5-91137-030-1. 136 с.
4. Ефимов Б.В., Колобов В.В. Продольная активно – индуктивная защита от высокочастотных перенапряжений на подстанциях при коммутации участков шин // Сборник докладов восьмой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. – С-Петербург, 2004. – С. 83-86.
5. Ефимов Б.В., Колобов В.В. Анализ эффективности продольной активно-индуктивной защиты от высокочастотных перенапряжений на подстанциях при коммутации участков шин. // Электромагнитная совместимость и перенапряжения в высоковольтных сетях. – Апатиты, 2004. – С. 70-92.
6. Колобов В.В. Экспериментальное определение кривой намагничивания тороидальных ферритовых сердечников, применяемых в устройствах продольной защиты. // Электрофизические проблемы надёжности эксплуатации высоковольтных сетей. – Апатиты, 2006. – С. 42-46.
7. Данилин А.Н., Колобов В.В. Методика и результаты измерений переходных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций. // Сборник докладов девятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. – С-Петербург, 2006. – С. 426-430.
8. Данилин А.Н., Колобов В.В. Исследование высокочастотных коммутационных перенапряжений на подстанциях 330 кВ ЦЭС ОАО «Колэнерго» и метод их снижения. // Электромагнитная совместимость и перенапряжения в высоковольтных сетях. – Апатиты, 2004. – С. 93-110.
9. Данилин А.Н., Колобов В.В. Методика и результаты измерений переходных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций. // Электрофизические проблемы надёжности эксплуатации высоковольтных сетей. – Апатиты, 2006. – С. 7-14.
10. Устройство для защиты от перенапряжений / Б.В. Ефимов, А.Н. Данилин, В.В. Колобов: А.с. № RU 2284622 С1 МПК H02H 9/04; H01C 8/04 // Бюл. изобретений. 2006. №27.