На правах рукописи

Астафьева Ольга Владимировна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ НИХ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ И КОМБИНАТОВ

специальность 05.14.12 – техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Халилов Фирудин Халилович**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор **Гольдштейн Валерий Геннадьевич**
	кандидат технических наук, **Колычев Александр Валерьевич**

Ведущая организация − Открытое акционерное общество "РУСАЛ Всероссийский Алюминиево-магниевый Институт" (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «__» _____ 2007 года в __ час. __ мин. в ауд. __ на заседании диссертационного совета К 212.229.03 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29.

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

Автореферат разослан «____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 212.229.03,
кандидат технических наук Н.И. Гумерова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В экономике страны важнейшая роль принадлежит цветной металлургии, которая во многом определяет технический прогресс государства. Российская Федерация занимает одно из первых мест в мире по производству всех основных цветных, редких и благородных металлов.

Важнейшим направлением развития отрасли на современном этапе является решение задачи повышения надежности, поскольку от безотказной работы основного и вспомогательного технологического оборудования металлургических заводов и комбинатов в большой степени зависит безаварийность и эксплуатационная гибкость работы систем в целом. Исследование перенапряжений − один из основополагающих факторов выполнения защиты сетей предприятий цветной металлургии. Разработка эффективных и контролируемых методов исследования перенапряжений с использованием современных вычислительных машин является в настоящее время ключевым звеном создания нового представления о выполнении защиты электрических сетей предприятий цветной металлургии.

Перспективным устройством, которое может использоваться для защиты сетей описываемой отрасли, являются нелинейные ограничители перенапряжений. Большое разнообразие подобных аппаратов российского и зарубежного исполнения, доказывает, что для выбора защитного устройства требуется глубокое представление вызвавшего перенапряжения переходного процесса. Помимо большого прикладного значения проведенных в работе исследований, использование новых методов является инструментом подтверждения фундаментальных исследований.

Актуальность темы диссертации в первую очередь определяется её значимостью для исследования перенапряжений сетей предприятий цветной металлургии, а также возникновением большого числа неохваченных задач, в том числе использование современных методик.

Целью работы являлось продвижение вперед в разрешении части существующих проблем, вызванных перенапряжениями в сетях среднего и высокого классов напряжения металлургических заводов и комбинатов. В первую очередь, это касалось решения ряда модельных задач исследования перенапряжений, реализованных путем составления расчетных схем, моделирующих возникающие в сетях переходные процессы, сопровождающиеся значительным повышением напряжения. Анализ полученных результатов исследования позволяет смоделировать варианты защиты от возникающих перенапряжений.

В соответствии с целью сформулированы следующие задачи работы:

1. разработка расчетных схем и адаптация их к современным пакетам схематического моделирования для исследования переходных процессов, возникающих при электромагнитных возмущениях в сетях средних и высоких классов напряжения предприятий цветной металлургии;
2. расчет кратностей перенапряжений на изоляции электрооборудования (электродвигателей, трансформаторов и др.) среднего и высокого класса напряжения, а также высоковольтных линий 110 кВ отрасли;
3. анализ полученных результатов, в том числе при использовании для защиты сетей описываемой отрасли нелинейных ограничителей перенапряжений;
4. анализ грозовых перенапряжений на подстанциях глубокого ввода 35 − 220 кВ и расчет показателя надежности (числа лет безаварийной работы);
5. анализ грозовых перенапряжений на стороне питания двигателя.

Научная новизна и практическая значимость работы

Комплекс решенных в диссертации задач при их методическом единстве является несомненным шагом вперед в решении проблемы защиты от перенапряжений сетей предприятий цветной металлургии.

Научная новизна заключаются в следующем:

1. впервые на базе существующих пакетов схематического моделирования разработана методика составления расчетных схем для исследования перенапряжений металлургических заводов и комбинатов;
2. впервые для сетей средних классов напряжения рассмотрена полная трехфазная модель системы электроснабжения предприятий цветной металлургии;
3. впервые при исследовании перенапряжений уточнено влияние параметров элементов расчетных схем, таких как нагрузка на шинах, момент замыкания контактов выключателя, мощность объекта, режим заземления нейтрали, длина питающего кабеля (для сетей средних классов напряжения);
4. впервые при исследовании коммутационных перенапряжений на зажимах двигателя учтены механические характеристики двигателя, и как доказательство правильности выполнения модели, получено совпадение рабочих характеристик (тока номинальной нагрузки, кратность пусковых токов, скорости вращения ротора) со справочными данными.

Практическая ценность данной работы заключается в том, что в ней проведено полное и систематическое исследование перенапряжений в сетях отрасли. Анализ полученных теоретических результатов исследования может быть использован для повышения надежности основного и вспомогательного технологического оборудования металлургических заводов и комбинатов, так

как позволяет смоделировать варианты защиты от возникающих перенапряжений.

В методическом плане значение диссертационной работы состоит в разработке ряда новых расчетных схем в пакетах схематического моделирования, расширяющих возможности исследований. Методические результаты, представляют самостоятельную ценность и могут быть использованы для решения других задач электроэнергетики и техники высоких напряжений.

На защиту выносятся:

1. Анализ полученных переходных процессов при оперативных и аварийных коммутациях электрооборудования (двигателей, трансформаторов и др.), а также при коммутациях высоковольтных линий 110 кВ;
2. Ряд моделей расчетных схем, в которых моделировались переходные процессы при коммутациях, дуговых замыканиях на землю, грозовых воздействиях;
3. Анализ грозовых перенапряжений на подстанциях глубокого ввода 35 − 220 кВ при использовании нелинейных ограничителей перенапряжений;
4. Анализ грозовых перенапряжений, пришедших на сторону питания электродвигателя.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях.

1. Российская научно практическая конференция молодых специалистов «Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники», СПб, 2001 г.
2. Международная научно-техническая конференция «Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования», Минск, 2004 г.

3. Восьмая научно-техническая конференция по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности «ЭМС-2004», СПб, 2004 г.
4. Международная научно-техническая конференция «Нелинейные ограничители перенапряжений: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, контроль состояния», СПб. 2005 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, которые приведены в списке публикаций.

Объем и структура диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 118 наименований и приложений. Полный объем диссертации − 224 стр.

Основное содержание диссертации

Во введении обозначена необходимость защиты от перенапряжений предприятий цветной металлургии, обоснована актуальность задачи, определена методика исследований перенапряжений, кратко изложено содержание диссертации и выдвинуты защищаемые положения.

Первая глава содержит обоснование необходимости исследования перенапряжений в сетях среднего и высокого классов напряжения металлургических заводов и комбинатов.

В эксплуатации на изоляцию электрооборудования и кабелей среднего и высокого напряжения предприятий цветной металлургии, кроме длительного рабочего напряжения, также воздействуют кратковременные внутренние и внешние перенапряжения. Эти перенапряжения, с учётом условий работы изоляции (высокая температура, повышенная загрязнённость, частые пуски и остановы, реверс электроприводов и др.), приводят к повышенному повреждению электрооборудования и кабелей. В условиях использования электрооборудования, исчерпавшего свой ресурс, любые электромагнитные возмущения могут привести к серьёзному повреждению изоляции.

Опасность тех или иных перенапряжений для изоляции определяется запасами её электрической прочности. Достоверных сведений о

характеристиках электрической прочности внутренней изоляции получить не возможно. Поэтому они косвенно характеризуются нормированными (ГОСТ 1516.3-96) испытательными напряжениями грозовых импульсов и нормированным испытательным напряжением промышленной частоты.

Приведены величины опасных для электрооборудования кратностей перенапряжений, превышение которых требует применения защиты.

В заключении первой главы определены поставленные диссертационной работой задачи.

Во второй главе проведено исследование коммутационных перенапряжений, возникающих на зажимах электродвигателя. Проведено исследование дуговых перенапряжений в сетях средних классов напряжения.

Разработан ряд расчетных схем для выполнения исследований возникающих при электромагнитных возмущениях в сетях средних классов напряжения при коммутациях электродвигателей предприятий цветной металлургии. Выполнена адаптация расчетных схем к вычислительной машине, с использованием современных пакетов схематического моделирования. На базе полученных схем разработана методика моделирования переходных процессов в зависимости от изменений параметров элементов системы.

В последние годы опубликовано большое количество работ, посвященных различным исследованиям перенапряжений при коммутациях электродвигателя. При исследованиях переходных процессов коммутаций отключения электродвигателя, в изученной литературе, полученные кривые напряжений имеют форму восстановления напряжения вокруг нуля, что указывает на то, что в используемых ранее расчетных схемах или при моделировании переходных процессов, не учитывалось наведенная в роторе двигателя электродвижущая сила. Однако использование новых

методик и современных пакетов схематического моделирования может показать более реальную картину переходных процессов.

При моделировании процессов включения электродвигателя на напряжение U=6 кВ рассмотрено, как влияет нагрузка на шинах, момент включения, длина питающего кабеля, мощность двигателя, компенсация реактивной мощности на шинах, режим заземления нейтрали на кратность перенапряжений. Например, несрабатывание контакта фазы выключателя (запаздывание по сравнению с другими), может привести к величинам кратностей до 3,6, расчетная схема и переходный процесс такого включения представлен на рис.1. На рисунке показаны кривые напряжений при одновременном замыкании контактов фаз *A* и *B* на максимуме напряжения (фазы А) и запаздывании фазы *C* на 7 мкс, из которых видно, что максимальная кратность перенапряжений равная отношению максимального напряжения переходного процесса к номинальному фазному напряжению на зажимах двигателя $K = U_{макс} / U_{д} = 17{,}755 / 4{,}9 = 3{,}6$.

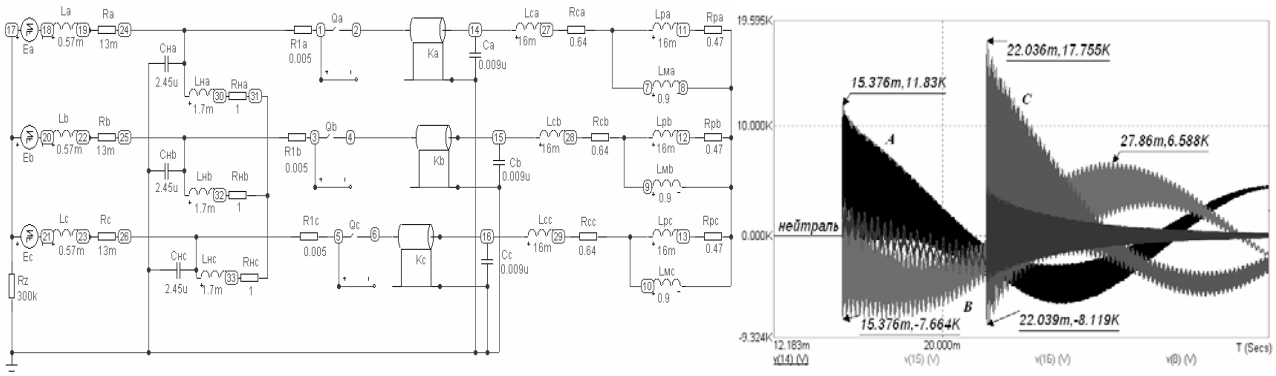

Рис. 1. Расчетная схема и кривые напряжения при включении двигателя с запаздыванием одной фазы выключателя.

Аналогично, при моделировании процессов отключения двигателя с учетом механических характеристик двигателя, а также ЭДС наведенной в роторе рассмотрено, как влияют элементы сети питания электродвигателя и изменения их параметров на кратность перенапряжений. Так, срез тока вакуумным выключателем (например, в исключительном случае – срезе тока в 10 А) при отключении двигателя мощностью 200 кВт, приводит к

кратности перенапряжений ─ 4,6. Двигатели на напряжение 6 кВ меньшей мощности имеют большую индуктивность, чем мощные двигатели, из-за этого запасенная в ней энергия в момент среза тока больше, чем у мощных двигателей.

При моделировании отключения пусковых токов двигателя проведенные исследования показывают, что на зажимах электродвигателя могут возникнуть опасные для его изоляции перенапряжения (например, в случае среза тока порядка 10 А – 3,3, а также при регламентированных режимах работы выключателя – 3,6).

При моделировании возникновения заземляющих дуг показано, что могут возникать опасные для изоляции двигателей перенапряжения, (кратности порядка 3,1), эти перенапряжения значительно снижаются при наличии в нейтрали дугогасящего реактора (до 2,8), а также дугогасящего реактора шунтируемого резистором– 2,1.

При организации защиты с помощью установки ОПН выбранного по линейному напряжению вблизи двигателя, ОПН полностью ограничивает перенапряжения при коммутациях. При установке ОПН на шине он не оказывает влияния на переходный процесс отключения.

Форма кривой напряжения фазы *C* в диапазоне трех первых периодов переходного процесса включения при работе ОПН в случае одновременного замыкании контактов фаз А и В на максимуме напряжения (фазы А), и запаздывании фазы показана на рис. 2. Максимальная кратность перенапряжений при установке защитного аппарата равна − 1,7.

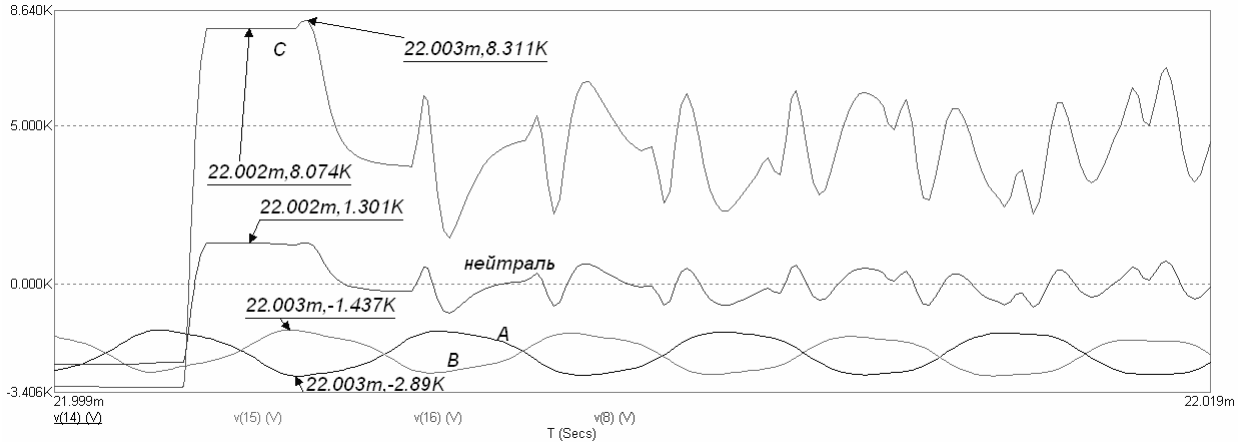

Рис. 2. Форма кривой напряжения в диапазоне трех первых периодов.

В третьей главе проведено исследование коммутационных перенапряжений, возникающих на зажимах ненагруженных трансформаторов среднего и высокого класса напряжения. Проведено исследование перенапряжений вызванных коммутациями ненагруженных высоковольтных линий. Для выполнения исследований разработан ряд расчетных схем реализованных в пакете схематического моделирования.

При моделировании процессов включения и отключения ненагруженного трансформатора на напряжении 6 кВ рассмотрено, как влияет нагрузка на шинах, длина питающего трансформатор кабеля, момент включения, мощность трансформатора, режим заземление нейтрали. Так при отключении ненагруженного трансформатора вакуумным выключателем, срезающим ток не более 5 А, при малых длинах (менее 30 м) питающего кабеля кратность перенапряжений в 4 раза больше по сравнению с большими длинами питающего кабеля (более 500 м). Расчетная схема и переходный процесс отключения ненагруженного трансформатора 6 кВ вакуумным выключателем при длине питающего кабеля в 10 м, показан на рис.3, из которого кратность перенапряжений равна 5.

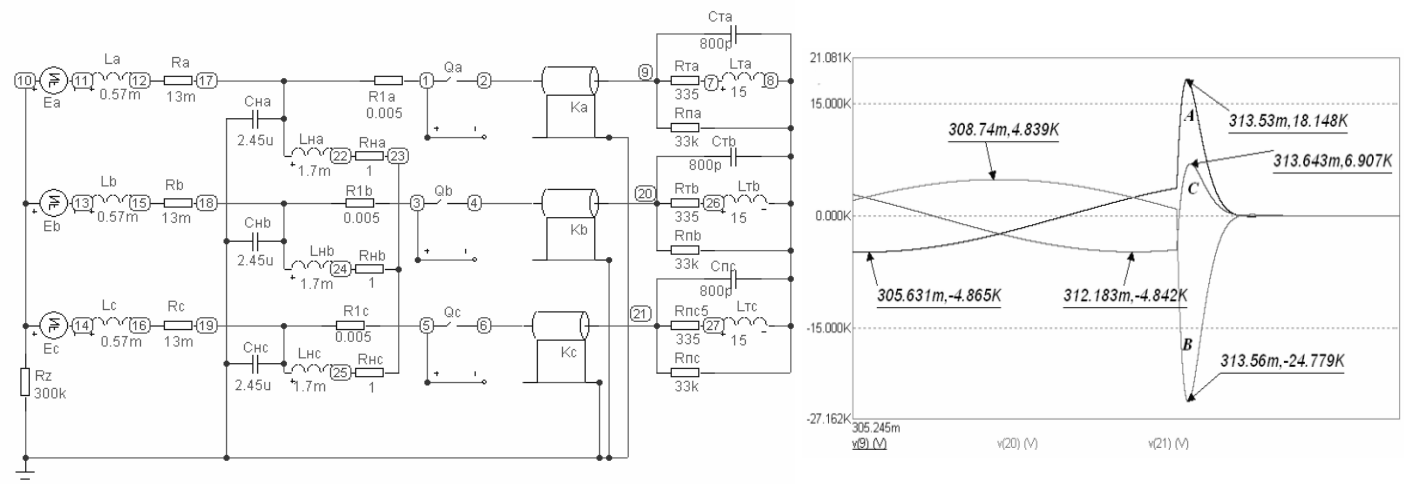

Рис. 3. Расчетная схема и кривые напряжений при переходном процессе отключения ненагруженного трансформатора 6 кВ с длиной питающего кабеля 10 м.

Выполняя защиту от перенапряжений трансформаторов среднего напряжения с помощью установки ОПН непосредственно перед трансформатором, можно отметить, что ОПН полностью ограничивает перенапряжения при коммутациях, при установке ОПН на шине он не оказывает влияние на переходные процессы, возникающие при коммутациях.

При исследовании коммутаций высоковольтных линий расчеты показали, что кратность перенапряжений сильно зависит от длин других отходящих от узловой системы ВЛ. Если их длина меньше или ровна коммутируемой ВЛ, то кратность перенапряжений при включении ввиду многократного отражения может существенно увеличивается. При отключении ненагруженной ВЛ перенапряжения отсутствуют. При возникновении повторного пробоя межконтактного промежутка выключателя, кратность может дойти до 3,4, что не является опасным для гирлянды изоляторов.

На кратность перенапряжений при отключении ненагруженного трансформатора 110 кВ сильно влияет величина срезаемого тока. Так при срезаемом токе выше 5 А возникают опасные для изоляции трансформатора перенапряжения, достигающие 4,9. При включении ненагруженного трансформатора не были получены опасные кратности перенапряжений. Если

коммутации ненагруженного трансформатора 110 кВ производят выключателем, установленным со стороны узловой ПС, то переходные процессы в трансформаторе демпфируются подводящей линией.

При установке ОПН на зажимах высокого напряжения силового трансформатора кратность перенапряжений снижается до безопасного уровня.

В четвертой главе проведен анализ грозозащиты подстанций глубокого ввода 35 − 220 кВ.

Надежность электрических сетей и их отдельных элементов может быть охарактеризована комплексом показателей. Они базируются на статистических методах, так как сбор и обработка статистических данных эксплуатации является единственным возможным методом получения количественных значений показателей надёжности действующих сетей. Для расчёта грозозащиты подстанций 35 − 220 кВ предприятий цветной металлургии в главе обоснованы характеристики изоляции защищаемого оборудования, изоляции линий на подходе к подстанции и их волновых сопротивлений, средств защиты от перенапряжений, входных параметров электрооборудования и однолинейных принципиальных схем распределительных устройств с реальными размерными данными.

Для анализа повреждаемости электрооборудования 35 – 220 кВ произведен расчет показателя надёжности для наиболее распространенных типовых схем подстанций глубокого ввода(мостик, четырехугольник), представляющий собой число лет безаварийной работы при грозовых ситуациях или число лет, в течение которых будет иметь место хотя бы одно грозовое повреждение.

Анализ показал достаточно высокую повреждаемость электрооборудования. При установке ОПН показатель надежности подстанций повышается по сравнению с использованием вентильных разрядников.

В пятой главе проведено исследование грозовых воздействий, при переходе волны на сторону питания двигателя.

Расчеты показали, что при грозовых перенапряжениях предельно безопасное значение тока молнии для изоляции трансформатора 110 кВ при прорыве молнии на провод вблизи ПС без перекрытия изоляции ВЛ, составляет 4 кА. При перекрытии изоляции ВЛ - составило 8 кА.

При ударе молнии в опору без грозозащитного троса предельно безопасное значение тока молнии для изоляции трансформатора 110 кВ составляет 55 кА (при ударе вблизи ПС). При ударе молнии в опору с грозозащитным тросом и при ударе молнии в грозозащитный трос предельно безопасное значение тока составляет 60 кА.

Расчетная схема удара молнии в грозозащитный трос представлена на рис. 4(а). Кривые напряжения на зажимах двигателя (кривая 1), напряжения после трансформатора (кривая 2), напряжения в ОПН (кривая 3) и тока протекающего через ОПН 6 кВ (кривая 4), показаны на рис. 4(б), из которого видно, кратность перенапряжений на двигателе не превышает 2,5 (опасный уровень 2,9), т.е. ОПН полностью защищает двигатель. Ток, протекающий через ОПН порядка 1 кА.

Исследования показали, что при грозовых волнах, пришедших с линии, с использованием системы защиты от перенапряжений, выполненной защитными аппаратами ОПН на стороне 110 кВ и на стороне среднего напряжения 6 кВ, при работе одного двигателя возникают опасные для его изоляции перенапряжения, которые полностью ограничиваются ОПН. При рассмотрении отдельного двигателя с работой двигательной нагрузки на шинах, опасных перенапряжений не было получено и ОПН 6 кВ не оказывает влияния на переходный процесс.

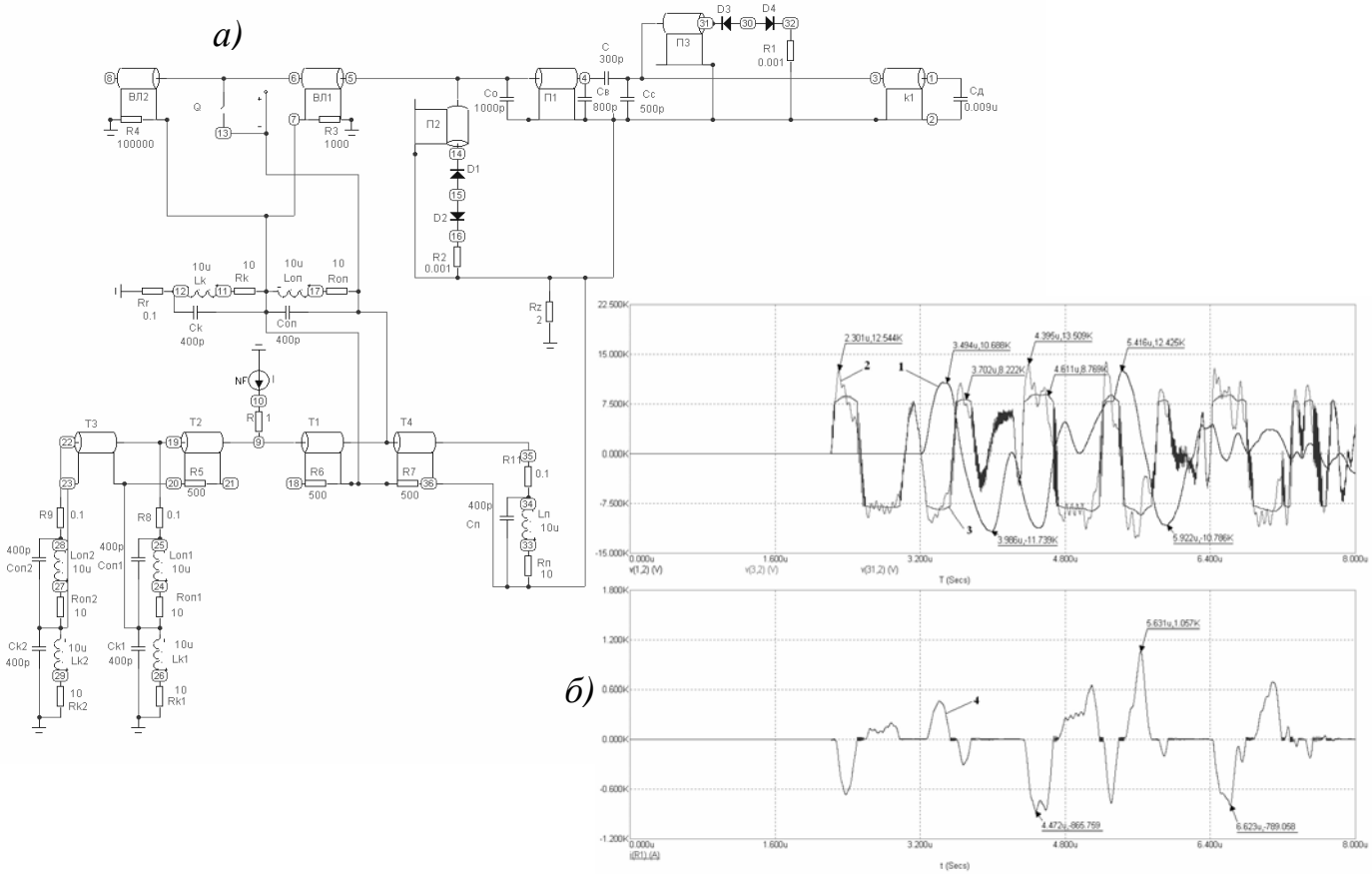

Рис. 4. Удар молнии в грозозащитный трос: а.) расчетная схема; б).кривые напряжения в точке удара молнии (кривая 1), на зажиме трансформатора (кривая 2), напряжения в ОПН (кривая 3), тока молнии (кривая 4), тока в ОПН 110 кВ (кривая 5).

В заключении приводятся основные результаты работы.

Основные результаты и выводы

По сетям 6-35 кВ

1. При коммутациях включения электродвигателей кратности перенапряжений могут достигать $K_{макс}$=3,6. На величину кратности на зажимах электродвигателей 6 и 10 кВ при включении сильное влияние оказывают момент замыкания контактов и неодновременное срабатывание контактов фаз выключателя. Практически не влияют номинальная нагрузка на шинах, мощность включаемого двигателя, длина кабеля, питающего двигатель, режим заземления нейтрали, компенсация реактивной мощности.

2. Максимальная кратность перенапряжений при отключении электродвигателей составляет $K_{макс}$=4,6. На величину кратности при

отключении влияют срез тока вакуумным выключателем, мощность отключаемого двигателя, разброс в срабатывании контактов фаз выключателя. Не влияют: номинальная нагрузка на шинах, компенсация реактивной мощности, длина кабеля, питающего двигатель.

3. При отключении пусковых токов двигателя были получены опасные для его изоляции перенапряжения (например, в случае исключительного среза тока порядка 10 А – $K_{макс}$=3,3, а также при неодновременном срабатывании контактов фаз выключателя $K_{макс.}$= 3,6).

4. При коммутациях отключения ненагруженных трансформаторов кратности перенапряжений могут достигать $K_{макс}$=5. На величину кратности при включении оказывают влияние разброс при срабатывании контактов фаз выключателя и момент замыкания контактов. На них не влияют: номинальная нагрузка на шинах, режим заземления нейтрали, мощность включаемого трансформатора. Максимальные рассчитанные кратности перенапряжений при включении могут составлять $K_{макс}\leq 3$. При отключении на величину кратности сильно влияют длина питающего кабеля и мощность отключаемого трансформатора. На величину кратности перенапряжений при отключении не влияют номинальная нагрузка на шинах и режим заземления нейтрали.

5. При выполнении защиты электрооборудования от коммутационных перенапряжений в сетях 6-35 кВ ОПН полностью ограничивают перенапряжения при их установке перед каждым электроагрегатом в непосредственной близости от него.

<u>По сетям 110-220 кВ</u>

1. При коммутациях высоковольтных линий кратности перенапряжений сильно зависят от длин других ВЛ, отходящих от узловой системы. Если их длина меньше или равна коммутируемой ВЛ, то кратность перенапряжений при включении вследствие многократных отражений существенно увеличивается. При отключении ВЛ с возникновением

повторного пробоя межконтактного промежутка выключателей, кратности могут дойти до $K_{макс}$=3,4.

2. На кратность перенапряжений при отключении ненагруженных трансформаторов 110 кВ сильно влияет величина срезаемого тока (при возможном использовании вакуумного выключателя). Так, при срезаемом токе выше 5 А возникают опасные для изоляции трансформатора перенапряжения, достигающие $K_{макс}$=4,9. Если коммутации ненагруженного трансформатора 110 кВ производят выключателем, установленным со стороны узловой ПС, то переходные процессы в трансформаторе демпфируются подводящей линией.

3. Для защиты от коммутационных перенапряжений трансформаторов 110-220 кВ требуется установка ОПН в непосредственной близости от них.

4. При ударе молнии в опору вблизи ПС без грозозащитного троса для изоляции трансформатора предельно безопасный ток составляет $I_{кр}$=55 кА. При ударе молнии в опору с грозозащитным тросом $I_{кр}$=60 кА, в грозозащитный трос также $I_{кр}$=60 кА.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Астафьева О. В., Халилов Ф.Х., Янчус Э.И. Программы для исследования дуговых перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью // Материалы Российской научной практической конференции молодых специалистов. «Проблемы создания и эксплуатации электрических машин, электрофизической аппаратуры и высоковольтной техники», издательство СПбГТУ, СПб, 2001 г. - с. 49 − 54.

2. Астафьева О. В., Халилов Ф.Х., Янчус Э.И. Необходимость защиты электрических сетей предприятий цветной металлургии от перенапряжений// Материалы международной научно-технической конференции «Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования», выпуск 3, издательство ПЭИПК, Минск, 2004 г., с. 62 − 68.

3. Халилов Ф.Х., Шилина Н.А., Астафьева О. В.. Вопросы надёжности грозозащиты подстанций ВН в условиях старения защитных аппаратов // Сборник докладов восьмой научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности «ЭМС-2004» под редакцией д.т.н. Фоминича Н. Э., СПб, 2004 г. - с. 41 − 45.
4. Халилов Ф.Х., Янчус Э.И. , Астафьева О. В., Эйвазов Д. Г. Ограничители перенапряжений 110 − 220 кВ подстанций глубокого ввода предприятий цветной металлургии// Материалы международной научно-технической конференции «Нелинейные ограничители перенапряжений: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, контроль состояния», СПб. 2005 г., издательство ПЭИПК, СПб, 2005 г., с. 142 − 149.
5. Астафьева О.В., Халилов Ф.Х. Исследование перенапряжений при включении двигателей металлургических заводов и комбинатов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. - 2006. - №6 т.1., с. 55 − 58.