

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

к.т.н. Дмитриев М.В.

**Грозовые перенапряжения
на оборудовании РУ 35-750 кВ
и защита от них**

**Санкт-Петербург
2006**

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПРИНЦИПЫ ЗАЩИТЫ РУ 35-750 кВ ОТ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ	5
1.1. Обустройство защищенных подходов	5
1.2. Расстановка защитных аппаратов	6
1.3. Отказ от грозозащитных тросов	8
1.4. Характеристики ОПН, устанавливаемых на входе РУ	10
1.5. Некоторые предварительные выводы	11
2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ	12
2.1. Модель распределительного устройства	12
2.2. Модель присоединенных к РУ воздушных линий	13
2.3. Моделирование импульса тока молнии	16
2.4. Статистический метод, используемый для анализа грозовых перенапряжений на оборудовании РУ	17
3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ	19
3.1. Расчет допустимых расстояний от оборудования до защитных аппаратов в зависимости от их типа	19
3.2. Расчет необходимой длины тросового подхода ВЛ	29
3.3. Каскадные схемы защиты оборудования и их эффективность	31
3.4. Учет обратных перекрытий на присоединенных ВЛ	33
3.5. Оценка числа лет безаварийной работы оборудования при грозовых перенапряжениях	36
4. АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИХ КОРРЕКТИРОВКЕ	38
4.1. Анализ требований ПУЭ в части грозозащиты РУ	38
4.2. Предложения по корректировке ПУЭ	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	43

.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации изоляция оборудования распределительных устройств (РУ) подвергается воздействию рабочего напряжения, а также различных видов перенапряжений, среди которых важное место занимают грозовые (атмосферные).

По данным ОРГРЭС только за период с 1997г. по 2001г. в результате атмосферных воздействий повредилось силовых трансформаторов – 68 шт., измерительных трансформаторов – 124.

Например, 25.06.04 г. произошел пробой изоляции автотрансформатора 330 кВ на ПС «Тихорецкая» МЭС Юга во время грозы. Экономический ущерб составил 69,164 млн. рублей.

Грозовые перенапряжения представляют реальную опасность для оборудования сетей практически всех классов номинального напряжения и, следовательно, требуют разработки и внедрения эффективных защитных мер, одной из которых является применение специальных защитных аппаратов – вентильных разрядников (РВ) и ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН).

Защитные свойства РВ и ОПН основаны на нелинейности вольтамперной характеристики их рабочих элементов, обеспечивающей заметное снижение сопротивления при повышенных напряжениях и возврат в исходное состояние после снижения напряжения до нормального рабочего. Низкая нелинейность вольтамперной характеристики рабочих элементов в разрядниках не позволяла обеспечить одновременно и достаточно глубокое ограничение перенапряжений, и малый ток проводимости при воздействии рабочего напряжения, от воздействия которого удалось отстроиться за счет введения последовательно с нелинейным элементом искровых промежутков. Значительно большая нелинейность окисно-цинковых сопротивлений (варисторов) ограничителей перенапряжений ОПН позволила отказаться от использования в их конструкции искровых промежутков, т.е. нелинейные элементы ОПН присоединены к сети в течение всего срока его службы.

В настоящее время вентильные разрядники практически сняты с производства и в большинстве случаев отслужили свой нормативный срок службы. Построение схем защиты изоляции оборудования как новых, так и модернизируемых распределительных устройств, от грозовых и коммутационных перенапряжений теперь оказывается возможным только с использованием ОПН.

Идентичность функционального назначения РВ и ОПН и кажущаяся простота конструкции последнего часто приводят к тому, что замену разрядников на ограничители перенапряжений проводят без проверки допустимости и эффективности использования устанавливаемого ОПН в рассматриваемой точке сети. Вместе с тем типовые схемы защиты изоляции оборудования от перенапряжений и характеристики защитных аппаратов были обоснованы несколько десятилетий назад с использованием упрощенных расчетных моделей, так как возможности вычислительной техники были весьма ограничены.

В частности, вопросы защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений с помощью вентильных разрядников рассмотрены в правилах

устройства электроустановок (ПУЭ), где для различных схем открытых распределительных устройств в зависимости от числа и типа вентиляных разрядников даны максимальные расстояния до оборудования. Впервые требования ПУЭ в части расстояний от вентиляных разрядников до защищаемого оборудования были сформулированы еще в 1961 году с помощью так называемых анализаторов грозозащиты и с тех пор до недавнего времени не пересматривались. Одним из подтверждений этого служит то, что требования по защите оборудования РУ 750 кВ от грозовых перенапряжений были добавлены в ПУЭ лишь сравнительно недавно, тогда как класс напряжения 750 кВ появился в СССР еще в 70-е годы.

В последней (7-й) редакции ПУЭ впервые помимо вентиляных разрядников в качестве защитного аппарата от грозовых перенапряжений на оборудовании РУ рассматривается также и ОПН. В этой редакции ПУЭ допустимые расстояния от оборудования РУ до ОПН предлагается определять в соответствии с защитными характеристиками ОПН на основе требований к расстояниям до вентиляных разрядников, приведенных в предыдущих редакциях ПУЭ. Следовательно, за основу построения защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений в последней редакции ПУЭ положены все те же требования ПУЭ еще 1961 года, полученные в весьма упрощенной постановке на анализаторах грозозащиты.

Развитие компьютерной техники и специализированного программного обеспечения позволяют на новом уровне проводить расчеты переходных процессов в электрических сетях для оптимизации схем защиты изоляции оборудования от перенапряжений и обоснованного выбора основных характеристик защитных аппаратов. Однако, несмотря на возможности моделирования и расчетов переходных процессов, в России до сих пор широко используют наработки многолетней давности, что стимулируется отсутствием простых в использовании и достаточно обоснованных современных методик расчета различных видов перенапряжений.

Сложившийся в России недостаток созвучных времени нормативных документов и методик расчета в области защиты изоляции оборудования от перенапряжений усугубляется массовым внедрением в энергетику страны защитных аппаратов типа ОПН, при использовании которых зачастую некорректно решаются задачи по выбору числа ОПН, мест их установки и основных характеристик, что является причиной повышенной аварийности как защищаемого оборудования, так и самих ОПН.

Ниже, с учетом современного уровня знаний и возможностей моделирования, рассмотрены основные проблемы, которые необходимо решать при построении схем защиты изоляции оборудования РУ от грозовых перенапряжений с помощью защитных аппаратов типа ОПН.

1. ПРИНЦИПЫ ЗАЩИТЫ РУ 35-750 кВ ОТ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Основной причиной грозových перенапряжений на изоляции оборудования распределительных устройств (РУ) 35-750 кВ являются воздействия молнии на присоединенные воздушные линии (ВЛ), вызывающие образование грозových волн, распространяющихся вдоль ВЛ. Защита изоляции оборудования РУ от набегающих по ВЛ грозových волн основана на ряде мероприятий [1-4]:

- обустройство защищенных подходов воздушных линий к распределительному устройству, на которых приняты меры по снижению числа грозových волн с опасными параметрами, возникающих на изоляции ВЛ вследствие ударов молнии;
- установка в выбранные места защитных аппаратов с необходимыми характеристиками (ранее - вентильных разрядников РВ, теперь - нелинейных ограничителей перенапряжений ОПН).

1.1. Обустройство защищенных подходов

При анализе грозových перенапряжений в РУ 35-750 кВ основными расчетными случаями являются прямые удары молнии в присоединенные ВЛ:

- удары молнии в фазные провода (например, точка 1 на рис.1);
- удары молнии в опоры (например, точка 2 на рис.1);
- удары молнии в трос (например, точка 3 на рис.1).

Для сетей 110 кВ с ударами молнии в землю вблизи от трассы ВЛ, приводящими к возникновению индуктированных перенапряжений, можно не считаться в силу относительно небольшой величины этих перенапряжений по сравнению с прочностью изоляции ВЛ и оборудования РУ.

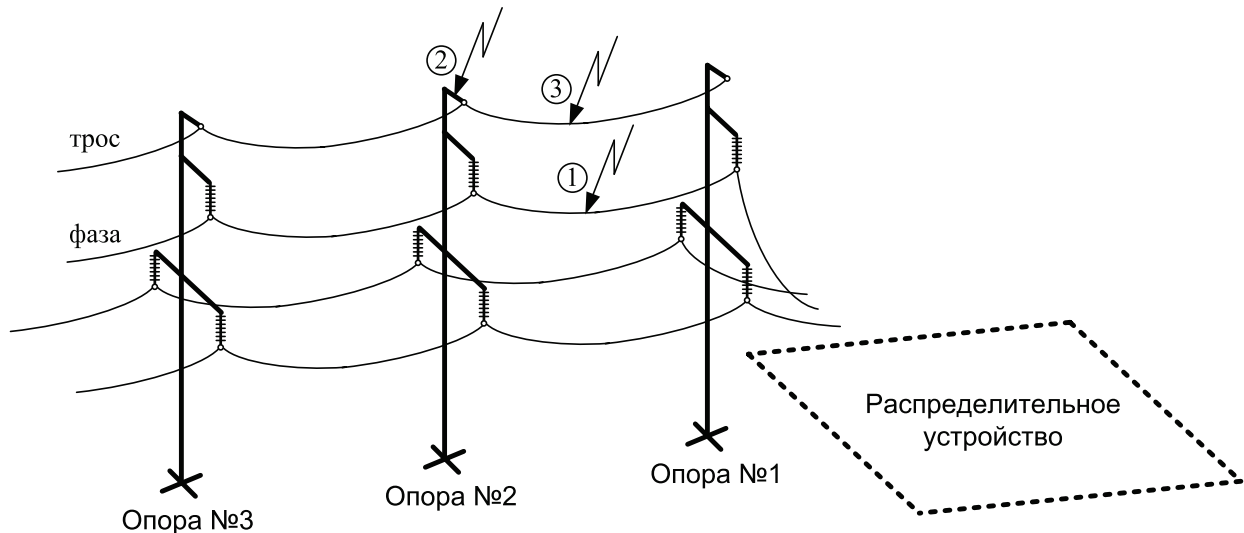


Рис.1. Возможные места ударов молнии в воздушную линию.

Требования к обустройству так называемых защищенных подходов воздушных линий к РУ приведены в ПУЭ [3] и направлены на снижение числа набегающих с ВЛ опасных грозových волн, вызванных ударами молнии в фазные провода, в опоры и тросы. При этом предполагается, что после реализации комплекса мер число возникающих на защищенном подходе опасных грозových

волн уменьшается, а грозовые волны, образующиеся на ВЛ на расстоянии более длины защищенного подхода, уже не представляют особой опасности для оборудования РУ вследствие заметного увеличения длительности их фронта из-за импульсной короны на проводах ВЛ.

Для обустройства защищенных подходов ПУЭ предписывает:

- установку на подходах присоединенных к РУ воздушных линий одного или нескольких грозозащитных тросов, обеспечивающих снижение вероятности прямого удара молнии в фазные провода ВЛ и соответствующее снижение числа образующихся на фазных проводах грозовых волн;
- выбор оптимального положения тросов на опоре, обеспечивающего минимальную вероятность прорыва молнии на фазные провода (снижение угла α на рис.2);
- снижение сопротивления заземления ближайших к РУ опор присоединенных ВЛ, в результате чего при ударе молнии в заземленный трос или опору линии уменьшается вероятность обратных перекрытий с тела опоры на фазные провода, т.е. вероятность появления на изоляции РУ грозовых волн с крутым фронтом.

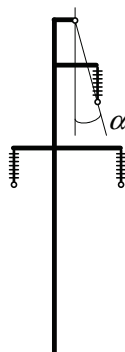


Рис.2. Определение угла α тросовой защиты на опоре воздушной линии.

1.2. Расстановка защитных аппаратов

Места установки в распределительном устройстве защитных аппаратов типа РВ и ОПН определены в правилах устройства электроустановок ПУЭ, где в качестве типовой рассматривается схема РУ, приведенная на рис.3. На этом рисунке условно показано, каким образом различное оборудование распределительного устройства располагается по ходу набегающей с воздушной линии грозовой волны. В расчетах грозовых перенапряжений трансформаторы и другие высоковольтные аппараты заменяются своими входными емкостями – на рис.3 можно видеть емкости силового трансформатора (Т) и измерительного трансформатора напряжения (ТН).

Учитывая конечную скорость электромагнитных волн при их распространении по проводам ВЛ и ошиновке РУ, грозовые перенапряжения в схеме рис.3 могут возникнуть

- на изоляции Т только в том случае, когда грозовая волна прошла за точку установки ОПН; при этом возникающие на Т перенапряжения напрямую определяются защитными характеристиками ОПН;

- на изоляции ТН даже в том случае, когда грозовая волна еще не дошла до ОПН, т.е. ОПН не вступил в работу по ограничению перенапряжений; при этом возникающие на ТН перенапряжения определяются в большей степени амплитудой грозовой волны, набегающей с ВЛ (т.е. сопоставимы с импульсной прочностью изоляции ВЛ, которая значительно выше изоляции оборудования РУ), а в меньшей степени – защитными характеристиками ОПН.

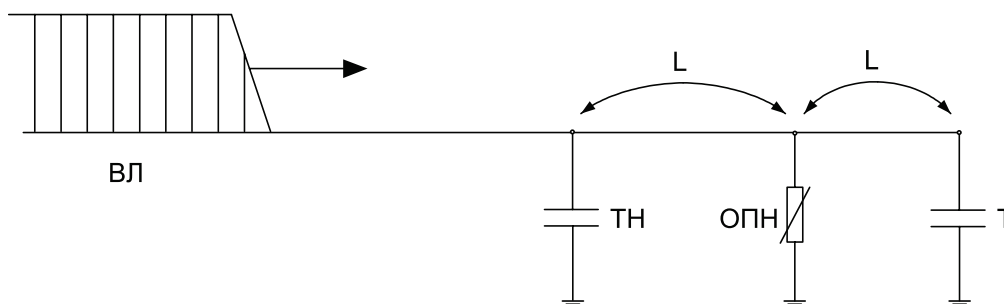


Рис.3. Типовая схема защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений.

В типовых схемах вида рис.3 ОПН устанавливается в непосредственной близости от силового трансформатора, как наиболее дорогостоящего оборудования, поэтому зачастую имеет место соотношение расстояний $L_2 > L_1$. Известно, что чем выше расстояние L от ОПН до защищаемого оборудования и чем меньше длительность фронта τ_ϕ набегающих грозовых волн, тем больше напряжение на оборудовании может превосходить напряжение на ОПН. Таким образом, наибольшим перенапряжениям подвергается не только оборудование, которое по ходу набегающей с ВЛ грозовой волны расположено до ОПН, но и наиболее удаленное от ОПН оборудование. В схеме рис.3 в качестве такого оборудования выступает ТН.

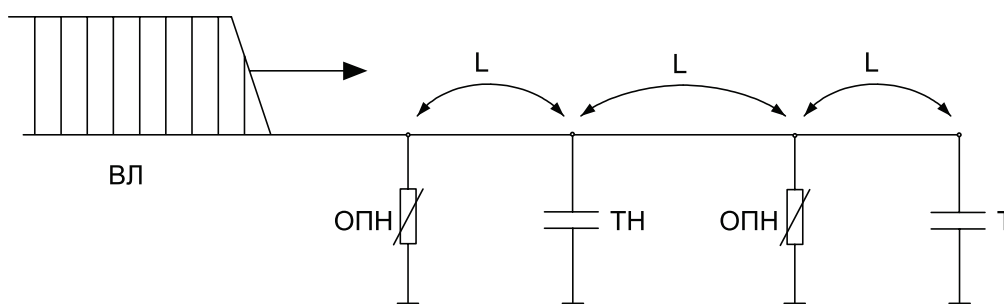


Рис.4. Каскадная схема защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений.

В мировой практике распространение нашла схема защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений, в которой на входе РУ устанавливают дополнительные ОПН (рис.4), позволяющие существенно повысить защищенность оборудования от грозовых (и коммутационных) перенапряжений, так как в этом случае:

- все оборудование находится по ходу набегающей с ВЛ волны после защитных аппаратов, т.е. грозовые перенапряжения на оборудовании РУ

определяются защитными характеристиками ОПН, обеспечивающими глубокое ограничение перенапряжений;

- снижены расстояния от оборудования до защитных аппаратов.

Схема, показанная на рис.4, известна достаточно давно и получила название каскадной, однако, к сожалению, в ПУЭ не рассматривается. Каскадный принцип защиты оборудования реализуется в случае, если ОПН установлены у обмоток силовых трансформаторов и автотрансформаторов, а также на каждой присоединенной ВЛ (см. рис.5), при этом установка ОПН на сборные шины не требуется. Высокоэффективной каскадная схема будет при выполнении условия $L_3 + L_2 > L_1$.

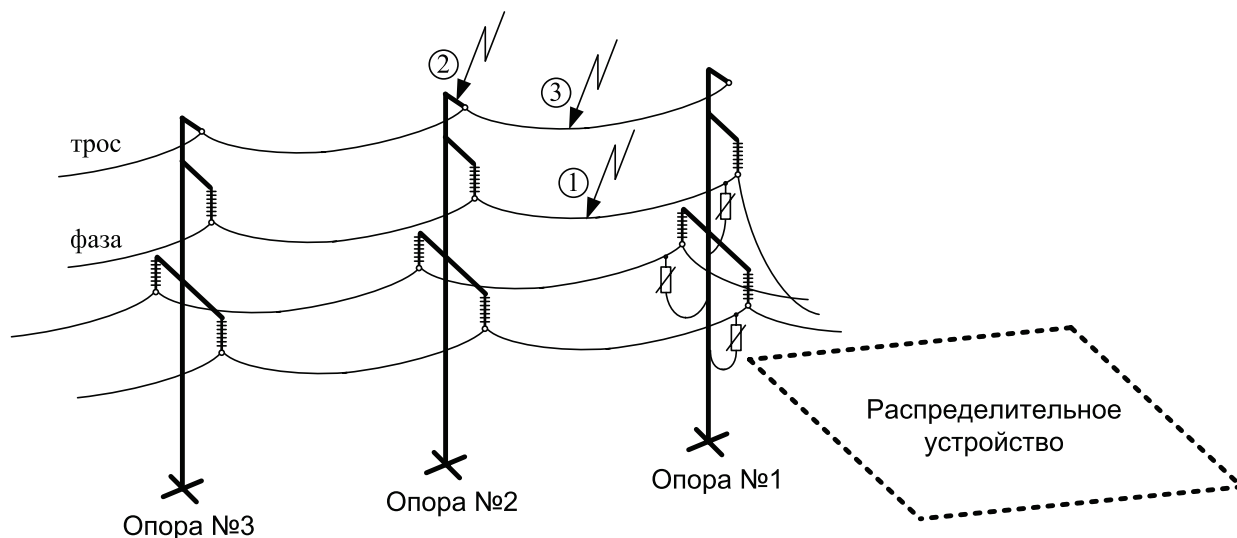


Рис.5. Установка ОПН на приемном портале («в линейную ячейку») как один из способов перехода к каскадной схеме защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений.

Согласно расчетам грозовых перенапряжений в каскадной схеме рис.4, отличающейся от рис.3 наличием на входе РУ дополнительных ОПН (так называемые ОПН линейной ячейки), вероятность повреждения изоляции оборудования РУ при грозовых перенапряжениях на порядок меньше, чем в типовой схеме рис.3.

1.3. Отказ от грозозащитных тросов

К сожалению, в эксплуатации требования ПУЭ не всегда удается реализовать в полной мере. В частности, подверженные коррозии и состаренные в процессе эксплуатации грозозащитные тросы в ряде случаев, не выдерживая ветровых и гололедных нагрузок, обрываются, создавая на линии короткие замыкания. Из-за недостаточного финансирования некоторые эксплуатирующие организации вынуждены идти на отказ от установки троса на ВЛ и, в том числе, на подходах ВЛ к РУ. Кроме того, не всегда удается привести в соответствие с требованиями ПУЭ сопротивления заземления опор ВЛ, которые зачастую превосходят максимально допустимые по ПУЭ значения, что характерно, например, для районов со скальными и песчаными грунтами.

Во всех перечисленных случаях, когда не выполняются требования ПУЭ по обустройству защищенных подходов ВЛ к РУ, необходим альтернативный способ

обеспечения защиты оборудования РУ от грозowych перенапряжений. В качестве такого способа можно рекомендовать использование каскадных схем, которые за счет своей эффективности позволяют сохранить защищенность оборудования на приемлемом уровне даже в случае существенного роста числа набегающих на РУ грозowych волн.

На рис.6 показан незащищенный тросами подход ВЛ к РУ. На входном портале установлен ОПН, который совместно с ОПН у силового трансформатора образует каскадную схему. Сравнительная эффективность схемы рис.6 (без троса) и типовой схемы рис.1 (с тросом) существенно зависит от класса номинального напряжения ВЛ и РУ.

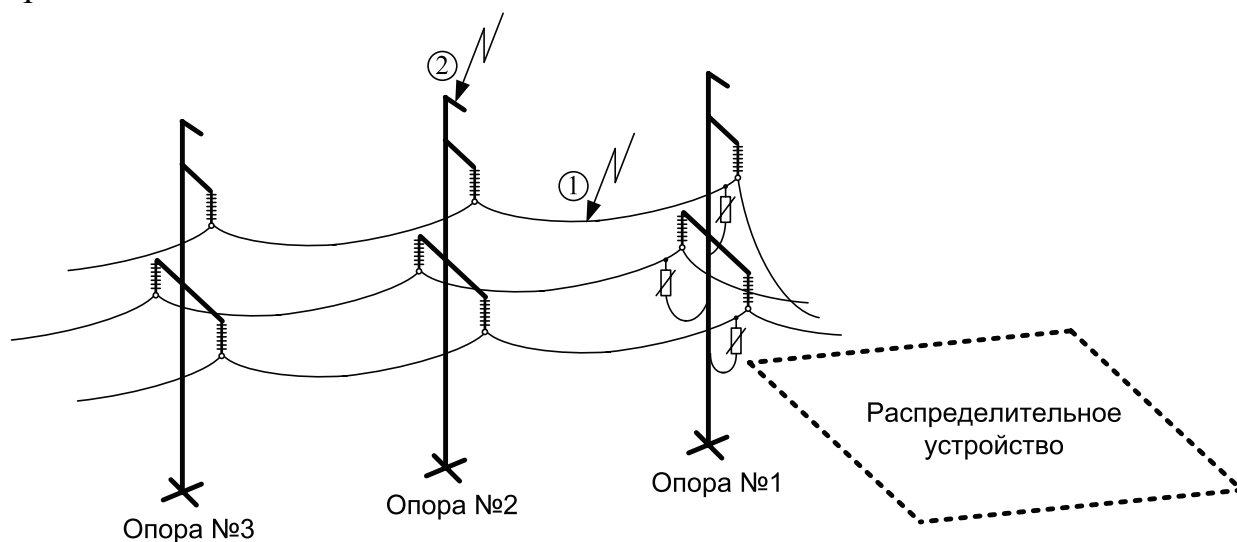


Рис.6. Установка ОПН на приемном портале как способ отказа от троса на подходе ВЛ.

Для классов 220-750 кВ основной причиной образования на ВЛ грозowych волн являются удары молнии в фазные провода. В случае, если на ВЛ установлен один или два троса, вероятность прорыва молнии на фазные провода соответствует одному случаю из $100 \div 1000$. Поэтому для сетей этих классов напряжения отказ от троса приводит к росту числа ударов в фазные провода в $100 \div 1000$ раз, тогда как каскадные схемы повышают защищенность лишь на порядок. Таким образом, увеличение числа грозowych волн и вызванное этим снижение защищенности оборудования РУ 220-750 кВ оказывается значительнее, чем повышение защищенности оборудования, достигаемое использованием каскадной схемы. Следовательно, для РУ 220-750 кВ каскадная схема не позволит отказаться от троса, а ее применение рекомендуется лишь как дополнительная мера повышения защищенности оборудования.

Для классов 35-110 кВ причинами образования на ВЛ опасных грозowych волн являются, главным образом, обратные перекрытия при ударах молнии в тросы и опоры. Отказ на подходе ВЛ к РУ от тросовой защиты приведет к тому, что основной причиной образования на ВЛ опасных грозowych волн станут удары молнии в фазные провода. При этом общее число грозowych волн, набегающих на РУ с присоединенных ВЛ, возрастет гораздо меньше, чем это было для РУ 220-750 кВ. Поэтому для РУ 35-110 кВ каскадная схема позволит в ряде случаев отказаться от троса без ухудшения защищенности оборудования.

1.4. Характеристики ОПН, устанавливаемых на входе РУ

Для заданной конструкции (производителя) ОПН выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН и его удельной энергии (тока пропускной способности) практически однозначно определяют остальные параметры ОПН. Поэтому выбор ОПН сводится к определению его наибольшего рабочего напряжения $U_{нро}$ и удельной энергоемкости $W_{уд}$ с последующей проверкой соответствия прочих характеристик (остающихся напряжений и др.) выбранного типа ОПН конкретным условиям эксплуатации.

Наибольшее рабочее напряжение ОПН на ВЛ 35-750 кВ выбирается таким же, как и для ОПН в распределительном устройстве. Исключение составляют ВЛ 500-750 кВ длиной более 200-300 км, при установке на которые $U_{нро}$ (а также $W_{уд}$) определяется в результате специальных расчетов.

Подробнее остановимся на характеристиках ОПН по допустимой энергии и току. Система молниеотводов исключает прямые удары молнии в оборудование распределительных устройств, а значит и в установленные там ОПН. В случае установки ОПН на опорах ВЛ становятся возможными прямые удары молнии в ОПН, т.е. существует реальный риск выхода из строя этих защитных аппаратов. Особенно такой риск велик в случае установки ОПН на ВЛ, не оснащенных грозозащитным тросом, так как в этом случае многие удары молнии в ВЛ приходятся не на заземленный грозозащитный трос, а в фазные провода, т.е. фактически непосредственно в ОПН.

Снижение риска повреждения ОПН 35-750 кВ в случае их применения на воздушных линиях 35-750 кВ достигается:

- совместным применением ОПН с грозозащитными тросами;
- выбором ОПН с повышенными энергоемкостью и допустимыми импульсными токами;
- увеличением числа опор ВЛ, на которых установлены ОПН, так как это приводит к снижению выделяющейся энергии в одном аппарате за счет рассеивания энергии разряда молнии не в одном ОПН, а в большом количестве работающих параллельно аппаратов.

Конкретное значение энергоемкости ОПН для ВЛ 35-750 кВ зависит от многих факторов (например, от наличия грозотроса):

- если тросовая защита есть (рис.5), то энергоемкость ОПН, устанавливаемого на ВЛ 35-750 кВ, может быть принята такой же, как и для ОПН в распределительном устройстве; исключение составляют ВЛ 500-750 кВ длиной более 200-300 км, при установке на которые $W_{уд}$ (а также $U_{нро}$) определяется в результате специальных расчетов;
- если тросовая защита не установлена (рис.6), то энергоемкость ОПН, устанавливаемого на ВЛ 35-750 кВ, не рекомендуется принимать менее $W_{уд} = 4$ кДж/кВ (по одному импульсу, приведена к $U_{нро}$).

Для обеспечения надежной работы ОПН на ВЛ 35-110 кВ, устанавливаемых при отказе от тросовой защиты на подходах к РУ, рекомендуется схема рис.7, сочетающая в себе схемы рис.5 и рис.6. Наиболее опасны для ОПН только удары

молнии в непосредственной от него близости, т.е. в точку 1 на рис.7, однако наличие троса над ОПН существенно снижает вероятность такого удара. Удары молнии в трос и опоры (точки 2,3,5 на рис.7) не представляют опасности для ОПН, так как являются ударами в заземленные конструкции и, поэтому, не приводят к протеканию в ОПН больших импульсных токов. Удары молнии в фазный провода на первом незащищенном тросом пролете (точка 4) вероятны (этот пролет не защищен тросом), однако не представляют особой опасности для ОПН, так как если молния была «мощной», то скорее всего перекроется изоляция ВЛ на опоре №2, и ОПН, установленный на опоре №1, будет шунтирован.

Расчеты для сетей 35-110 кВ свидетельствуют, что в схеме рис.7, несмотря на отсутствие троса (кроме ближайшего к РУ пролета ВЛ), достаточно применять ОПН, имеющий $W_{уд} = 2.0 \div 3.0$ кДж/кВ (по одному импульсу, приведена к $U_{нро}$), т.е. обладающий той же энергоемкостью, что и типовой ОПН 35-110 кВ, устанавливаемый в РУ 35-110 кВ.

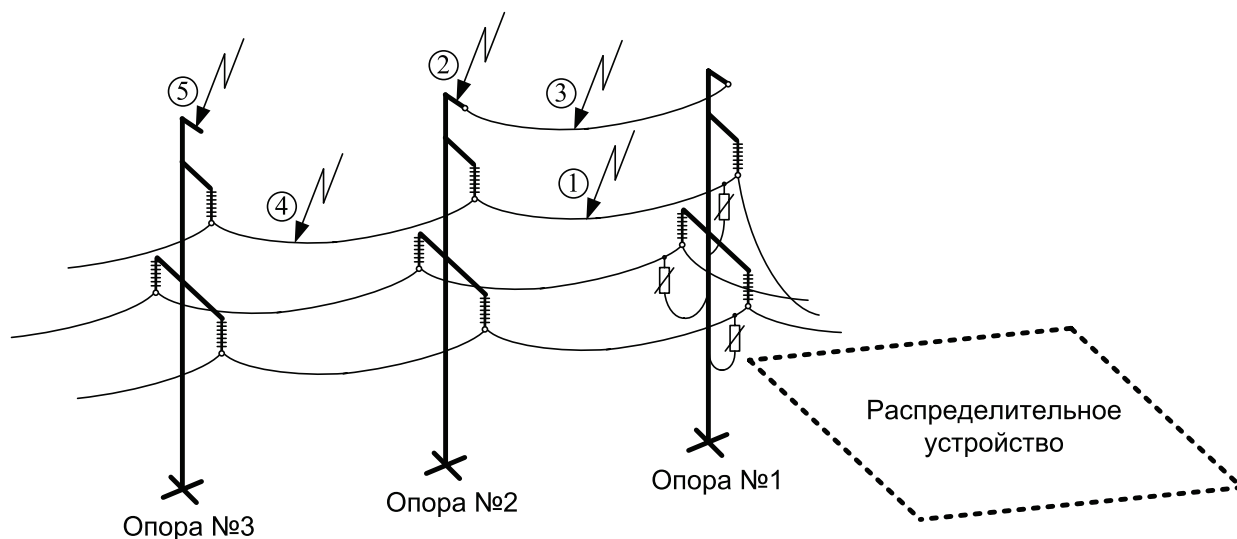


Рис.7. Обустройство защитного подхода ВЛ к РУ 35-110 кВ, обеспечивающее надежную эксплуатацию ОПН, установленного на ВЛ.

1.5. Некоторые предварительные выводы

Проведенные рассуждения позволяют сделать следующие предварительные выводы, требующие более детального обоснования, которое можно выполнить, например, при помощи подробного компьютерного моделирования грозовых перенапряжений:

- каскадные схемы рекомендуются для всех РУ 35-750 кВ как высокоэффективный способ защиты оборудования от грозовых (и коммутационных) перенапряжений;
- для некоторых РУ 35-750 кВ каскадные схемы позволяют снизить длину тросового подхода ВЛ к РУ или вовсе отказаться от троса без заметного ухудшения защищенности оборудования.

2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Использование компьютерного моделирования переходных процессов позволит оценить эффективность каскадных защитных схем по сравнению с типовыми, проверить обоснованность требований ПУЭ к расстановке защитных аппаратов в РУ и обустройству защищенных подходов ВЛ.

Для расчетов грозовых перенапряжений на оборудовании РУ использован известный канадско-американский программный комплекс ЕМТР (Electromagnetic Transients Program [5-7]), дополненный рядом уникальных специализированных модулей, позволяющих учесть вольт-секундную характеристику изоляции, импульсную корону на проводах ВЛ, статистические данные по параметрам импульса тока молнии.

Расширенный дополнительными модулями программный комплекс ЕМТР позволяет проводить расчеты грозовых перенапряжений на оборудовании при подробном моделировании процессов в РУ совместно с процессами в присоединенных ВЛ, т.е. разработанная на базе ЕМТР компьютерная модель для анализа грозовых перенапряжений состоит из модели распределительного устройства и моделей присоединенных воздушных линий электропередачи.

2.1. Модель распределительного устройства

Переход от реальной схемы РУ к расчётной эквивалентной схеме осуществлен с учётом определённых правил и допущений:

- Считаются пренебрежимо малыми потери в проводах и земле, а также пренебрегается влиянием соседних фаз (РУ смоделировано в однофазной постановке) и эффектом короны на проводах ошиновки РУ (корона на линии учтена). Возможности программного комплекса ЕМТР позволяют моделировать РУ в трехфазной постановке, однако ряд контрольных расчетов, а также данные [2] свидетельствуют об отсутствии такой необходимости для решения практических задач.
- Учитывая то, что расчет грозовых перенапряжений в РУ при отказе от учета волнового характера процессов может привести к существенным погрешностям [8], участки ошиновки, соединяющие оборудование, приняты однопроводными линиями без потерь заданной длины и моделируются волновыми параметрами [1,8] (волновым сопротивлением Z и скоростью распространения электромагнитной волны, которая принимается равной $v = 300$ м/мкс). Волновое сопротивление Z ошиновки задается по данным [1] в зависимости от класса номинального напряжения РУ.
- Трансформаторы и другие высоковольтные аппараты заменяются их входными емкостями, усредненные величины которых указаны в [1,9].
- Нелинейный ограничитель перенапряжений моделируется нелинейным сопротивлением [10], вольтамперная характеристика которого задается выражением $U = AI^\alpha$. Показатель степени α для анализа грозовых перенапряжений принимается $\alpha = 0.08$, а коэффициент A определяется по одной известной точке вольтамперной характеристики моделируемого ОПН, в

качестве которой, как правило, используется остающееся напряжение на импульсе тока 8/20 мкс с максимальным значением 10 кА.

- Импульсное сопротивление заземления ОПН принимается равным нулю. Соединительный шлейф между ОПН и ошиновкой РУ моделируется сосредоточенной индуктивностью, величина которой определяется длиной шлейфа и его погонной индуктивностью (принята равной 1 мкГн/м).
- Согласно [11] считается, что для изоляции оборудования в эксплуатации допустимо воздействие грозового перенапряжения с амплитудой не более

$$U_{\text{доп}} = 1.1(U_{\text{исп}} - 0.5U_{\text{ном}}), \quad (1)$$

где $U_{\text{исп}}$ – испытательное напряжение полного грозового импульса нового оборудования по [12], $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение оборудования. Допустимые кратности грозовых перенапряжений считаются одинаковыми вне зависимости от формы импульса грозового перенапряжения на изоляции оборудования.

2.2. Модель присоединенных к РУ воздушных линий

В каждом расчетном случае удара молнии в ту или иную ВЛ все присоединенные к РУ воздушные линии условно разделяются на две группы:

- воздушная линия, с которой на РУ набегают грозовая волна, вызванная разрядом молнии в опору, трос или фазный провод этой линии (рис.1);
- остальные воздушные линии.

Подход к РУ воздушной линии, относящейся к первой группе, моделируется подробно в трехфазной постановке в соответствии со своими конструктивными особенностями (тип опоры, длина пролета и проч. – см. ниже). Воздушные линии, относящиеся ко второй группе, моделируются упрощенно, т.е. активными сопротивлениями, равными волновому сопротивлению фазного провода [2].

Опора ВЛ. На подходах к РУ все опоры подробно моделируемой ВЛ могут быть приняты:

- одинаковыми, соответствующими типовой конструкции промежуточной опоры, наиболее широко применяемой для ВЛ рассматриваемого класса номинального напряжения;
- различными, характерными для конкретной ВЛ на подходе к РУ.

В любом из двух указанных случаев модель каждой опоры, установленной на подходе ВЛ к РУ, представляет собой набор индуктивностей [1], величины которых определены с использованием известной геометрии опоры (см. [13]) и погонных индуктивностей опор (около 0.5÷1.0 мкГн/м по [1]); каждая опора (см. рис.13) заземлена через активное сопротивление, моделирующее заземляющее устройство. Величина сопротивления заземления опор каждый раз оговаривается отдельно.

В нормативных документах [3] и протоколах измерений, как правило, указаны сопротивления опор растеканию тока, полученные методом «вольтметр-амперметр», однако для расчета грозовых перенапряжений требуется величина импульсного сопротивления опор. С некоторой погрешностью импульсное

сопротивление заземления опоры можно принять равным сопротивлению растекания. Такое допущение возможно, поскольку с одной стороны в импульсном режиме из-за пробоя грунтов при больших импульсных токах через опору коэффициент импульса становится меньше единицы, с другой – в таком режиме сказывается индуктивность лучей заземлителя, что увеличивает коэффициент импульса. В итоге упомянутые факторы в значительной степени взаимно компенсируются.

Фазные провода и тросы. Воздушная линия представлена совокупностью расположенных между опорами участков ВЛ (пролетов). Каждый участок (пролет) ВЛ моделируется многопроводной линией, состоящей из фазных проводов и тросов, взаимное расположение которых задается в зависимости от выбранного типа опоры с учетом длины гирлянды изоляторов. Длина пролетов может быть принята:

- усредненной (например, по данным [13]), равной для ВЛ 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ, соответственно, 250, 300, 350, 400, 450, 500 м;
- реальной, имеющей место для ВЛ, присоединенных к конкретному рассматриваемому РУ.

Изоляция ВЛ. Перекрытие изоляции ВЛ 35-750 кВ наиболее вероятно на опоре, вдоль гирлянды изоляторов, т.е. там, где электрическая прочность промежутка «провод-земля» («провод-траверса») минимальна. Возможность перекрытия линейной изоляции при различных воздействующих перенапряжениях определяется ее прочностью, которая задается вольт-секундной характеристикой (ВСХ) [1,14]. При воздействиях, по форме близких к стандартному грозовому импульсу 1.2/50 мкс, согласно [14] вольт-секундная характеристика (в кВ) описывается выражением

$$u(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}}, \quad (2)$$

где t – предразрядное время (в мкс), а коэффициенты K_1 и K_2 находятся по длине гирлянды изоляторов L (выраженной в метрах) как $K_1 = 400 \cdot L$, $K_2 = 710 \cdot L$. Длина гирлянды изоляторов может быть принята:

- усредненной (например, по данным [13]), равной для ВЛ 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ, соответственно, $L = 0.7$ м, $L = 1.25$ м, $L = 2.3$ м, $L = 3.0$ м, $L = 4.0$ м, $L = 6.0$ м; полученные при таких длинах вольт-секундные характеристики гирлянд изоляторов ВЛ 35-750 кВ близки к рекомендациям [1];
- реальной, имеющей место для ВЛ, присоединенных к конкретному рассматриваемому РУ.

Импульсная корона на проводах ВЛ. По данным [2,11,15] динамическая емкость одиночного коронирующего провода описывается эмпирической формулой:

$$C_d = C_0 \left[1 + \frac{5}{3} A (u^* - 1)^{2/3} \right],$$

где $u^* = u / U_{нач}$ – мгновенное значение напряжение на проводе в относительных единицах, $U_{нач}$ – начальное напряжение общей короны, A – эмпирический

коэффициент, зависящий от полярности напряжения на проводе ($A^{(+)} = 0.78$, $A^{(-)} = 0.375$).

Емкость C_0 – собственная емкость некоронирующего провода, которая может быть определена через потенциальный коэффициент

$$\alpha = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{2h}{R_{\text{экв}}} \right],$$

$$C_0 = \frac{1}{\alpha},$$

где $R_{\text{экв}} = (n \cdot r_0 \cdot R^{n-1})^{1/n}$ – эквивалентный радиус расщепленного провода [1], r_0 – радиус одного провода, n – число проводов в расщепленном, $R = \frac{D}{2} / \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)$ – радиус расщепления провода, D – шаг расщепления.

Начальное напряжение общей короны определено выражением [2,11,15]

$$U_{\text{нач}} = 2\pi\epsilon_0 m_0 E_{\text{нач}} \cdot \frac{r_0 n}{k_m C},$$

где $m_0 = 0.82$ – коэффициент негладкости провода (для витого провода); r_0 – радиус провода; n – число проводов в фазе; C – средняя емкость фазы; $E_{\text{нач}} = 29 \div 33 \approx 31$ кВ/см – начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению короны; $k_m = 1 + (n-1) \cdot r_0 / R$ – обозначение множителя формулы, обусловленного расчетом электростатического поля расщепленного провода.

Типовые значения числа проводов в расщепленной фазе n и радиуса r_0 составляющих приняты по [16], а результаты расчетов, выполненных при $h = 15$ м, $D = 0.4$ м, приведены в табл.1.1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета емкости коронирующего провода ВЛ.

$U_{\text{ном}}$, кВ	n	r_0 , см	$R_{\text{экв}}$, см	C_0 , пФ/м	$U_{\text{нач}}$, кВ
35	1	0.76	0.76	6.7	160
110	1	0.86	0.86	6.8	178
220	1	1.26	1.26	7.2	249
330	2	1.38	7.43	9.3	394
500	3	1.38	13.02	10.2	511
750	4	1.46	19.07	11.0	650

В программном комплексе ЕМТР импульсная корона на проводах ВЛ учтена при помощи дополнительных сосредоточенных емкостей (в дополнение к собственной распределенной емкости C_0 фазного провода), включаемых между фазными проводами и землей

$$C_d^{\text{ЕМТР}} = C_d - C_0 = C_0 \left[\frac{5}{3} A(u^* - 1)^{2/3} \right] = C_0 \left[1.667 A(u^* - 1)^{0.667} \right] \quad (3)$$

Так как все молнии считаются отрицательными [1,17], то достаточно моделировать импульсную корону только при отрицательной полярности напряжения на фазном проводе. В расчетной модели ЕМТР сосредоточенные

емкости, моделирующие импульсную корону при отрицательной полярности напряжения на фазном проводе, присоединены к фазным проводам ВЛ на расстоянии l друг от друга; в качестве входных параметров необходимо задавать класс напряжения линии $U_{ном}$ (кВ), длину участка линии l (м), для которой вычисляется емкость $C_0 l$. Далее, используя класс напряжения линии $U_{ном}$ и данные табл.1, программа ЕМТР определяет значения C_0 и $U_{нач}$.

На каждом шаге расчета в ЕМТР в каждом j -м блоке, моделирующем корону, с использованием емкости $C_0 l$ и мгновенного значения напряжения $u_j^* = u_j / U_{нач}$, измеренного на проводе в месте размещения j -го блока, осуществляется корректировка учитывающей корону емкости $(C_d^{ЕМТР})_j$ в соответствии с выражением (3).

В программном комплексе ЕМТР учтено влияние импульсной короны только на фронт распространяющихся от места удара молнии в ВЛ грозовых волн напряжения отрицательной полярности, а искажения «хвостовой» части импульса не учтены. Это достигнуто за счет подключения к фазным проводам моделирующих корону динамических емкостей $(C_d^{ЕМТР})_j$ через диоды, которые позволяют протекать импульсным токам с отрицательно заряженного фазного провода в незаряженные подключенные емкости, но исключают обратное направление протекания тока.

2.3. Моделирование импульса тока молнии

При решении задач грозозащиты для моделирования тока молнии часто используется двухэкспоненциальный импульс [1,18,19]

$$i(t) = \gamma \cdot I_{\max} \cdot [\exp(-at) - \exp(-bt)],$$

где a и b определяются скоростями нарастания и спада тока молнии, γ – корректирующий фактор амплитуды тока молнии.

Натурные осциллограммы токов молнии [1] свидетельствуют о наличии нулевой начальной производной, в то время как двухэкспоненциальный импульс имеет производную отличную от нуля в начальный момент времени. Поэтому в различных публикациях предложено большое количество обеспечивающих нулевую начальную производную функций, моделирующих форму тока молнии. Например, часто встречающееся выражение, обеспечивающее нулевую производную [18,19]

$$i(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t) \cdot y(t) = I_{\max} \cdot z(t) \cdot y(t), \quad (4)$$

где $x(t) = \frac{(t/t_1)^n}{1 + (t/t_1)^n}$, $y(t) = \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right)$, n – параметр, определяющий крутизну волны.

Сопротивление канала молнии составляет по различным оценкам величину $300 \div 1500$ Ом [1,17].

2.4. Статистический метод, используемый для анализа грозовых перенапряжений на оборудовании

Удар молнии в фазный провод ВЛ приводит к возникновению грозовой волны, которая, распространяясь в обе стороны от места удара молнии в линию, набегают на РУ. Наибольшую опасность для оборудования РУ представляют набегающие грозовые волны напряжения с большой крутизной фронта и большой амплитудой. Согласно [1,2] амплитуда набегающих волн ограничена импульсной прочностью изоляции ВЛ, а крутизна фронта – действием импульсной короны на проводах. Учитывая действие импульсной короны, удаленные на несколько километров от входа РУ удары молнии в присоединенные ВЛ уже не способны вызвать на изоляции оборудования опасные грозовые перенапряжения и, поэтому, наибольшую опасность для оборудования РУ представляют грозовые волны, вызванные близкими к РУ ударами молнии, т.е. ударами в зоне «опасного» подхода.

Для снижения числа ударов молнии в фазные провода на подходах к РУ на присоединенных линиях устанавливаются грозозащитные (молниезащитные) тросы [1,3]. Удары молнии в тросовую защиту в ряде случаев могут приводить к обратным перекрытиям с тела опоры на фазные провода. В таких случаях на фазных проводах образуются волны высокой крутизны фронта, которые могут вызывать на изоляции оборудования РУ опасные грозовые перенапряжения.

Разработанная в ЕМТР модель для расчета грозовых перенапряжений на оборудовании РУ учитывает статистическую природу параметров импульса тока молнии и удаленности от РУ места удара молнии в ВЛ (в фазный провод, в трос, в опору):

1. Выбирается i -я линия из $N_{ВЛ}$ присоединенных к РУ воздушных линий.
2. Задается расчетный случай (удар молнии в трос, в опору, в фазный провод).
3. Задается расстояние x от места удара молнии в линию до входа РУ.
4. Для выбранного случая в подробной ЕМТР-модели РУ многократно повторяется расчет грозовых перенапряжений на оборудовании. В каждом из расчетов параметры импульса тока молнии (форма импульса описывается выражением (4)) принимаются с учетом выбранного закона распределения параметров тока молнии.
5. Фиксируется число грозовых перенапряжений на конкретном оборудовании РУ (например, на силовом трансформаторе) с максимальным значением, превышающим допустимое значение $U_{дон}$ амплитуды грозовых перенапряжений для этого оборудования. Полученное число опасных перенапряжений соотносится с общим числом выполненных экспериментов, что дает вероятность появления опасных грозовых перенапряжений на конкретном оборудовании РУ при ударах молнии в i -ую присоединенную линию: $P_{np}^i(x)$ (при ударах в фазный провод), $P_{опора}^i(x)$ (при ударах в опору), $P_{трос}^i(x)$ (при ударах в трос).
6. На основе полученных для i -ой присоединенной линии зависимостей $P_{np}^i(x)$, $P_{опора}^i(x)$, $P_{трос}^i(x)$ определяется необходимая длина $l_{опасн}^i$ защищенного тросами

«опасного» подхода, за пределами которого удары молнии в эту ВЛ уже не вызывают опасных грозовых перенапряжений на оборудовании РУ.

7. На основе интегрирования для i -ой присоединенной линии зависимостей $P_{np}^i(x)$, $P_{опора}^i(x)$, $P_{трос}^i(x)$, полученных по результатам расчетов для нескольких значений расстояния x , определяются усредненные по длине $l_{опасн}^i$ «опасного» подхода значения $\overline{P_{np}^i}$, $\overline{P_{опора}^i}$, $\overline{P_{трос}^i}$, которые являются исходными данными для проведения расчетов годового числа опасных для изоляции оборудования перенапряжений n по формуле:

$$n = \frac{T_q}{100} \cdot \frac{N}{100} \cdot \sum_1^{N_{ВЛ}} \left[l_{опасн}^i \cdot \left(n_{np} \overline{P_{np}^i} + n_{опора} \overline{P_{опора}^i} + n_{трос} \overline{P_{трос}^i} \right) \right], \quad (5)$$

где T_q – число грозовых часов в году в районе расположения РУ (по карте грозовой активности из [1]), N – число ударов (на 100 км длины и 100 грозовых часов) молнии в ВЛ на опорах рассматриваемой конструкции, n_{np} – относительное число ударов молнии в фазный провод (вероятность прорыва молнии на фазные провода), $n_{опора}$ – относительное число ударов молнии в опору, $n_{трос}$ – относительное число ударов молнии в трос в середине пролета. Числовые значения N , n_{np} , $n_{опора}$, $n_{трос}$ могут быть определены по рекомендациям [1,11,14,20].

8. Определяется и сравнивается с рекомендациями [1] показатель $M = 1/n$ (1/лет) защищенности оборудования РУ (например, силового трансформатора) от грозовых перенапряжений.

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Разработанные модели для расчета грозовых перенапряжений на оборудовании РУ 35-750 кВ использованы при выполнении целевой программы ОАО «ФСК ЕЭС» по замене вентильных разрядников на ограничители перенапряжений на подстанциях в период 2005-2006 гг., в рамках которой проведены расчеты грозовых перенапряжений более чем в семидесяти РУ 35-750 кВ на 35 подстанциях. На основе анализа полученных в процессе выполнения этой работы результатов сделаны обобщающие выводы относительно защищенности оборудования РУ 35-750 кВ от грозовых перенапряжений, даны рекомендации по способам ее повышения, а также предложения по корректировке требований ПУЭ.

Ниже в качестве иллюстраций приведены результаты расчетов грозозащиты РУ 500 кВ подстанции «Луч» (МЭС Центра). Выбор подстанции «Луч», которая в целом является типовой в своем классе, обусловлен тем, что из двух присоединенных к этой подстанции ВЛ 500 кВ на одной защитный аппарат на входе РУ установлен, а на второй нет. Таким образом, на примере ПС «Луч» удобно сравнивать эффективность каскадных схем, имеющих на входе РУ защитный аппарат, с типовыми схемами, не имеющими такого аппарата.

3.1. Расчет допустимых расстояний от оборудования до защитных аппаратов в зависимости от их типа

Схема открытого распределительного устройства 500 кВ приведена на рис.8. В РУ установлено 4 комплекта защитных аппаратов (у автотрансформаторов АТ-1,2,3 и на ВЛ «Луч - Нижегородская»).

Составленная с учетом указанных выше допущений расчетная ЕМТР схема РУ 500 кВ приведена на рис.9: длины участков ошиновки определены по размерной схеме РУ 500 кВ и указаны в метрах на схеме рис.9; емкости автотрансформаторов (АТ), измерительных трансформаторов напряжения электромагнитного (ТН) и емкостного типа (НДЕ), воздушных выключателей (ВВ), измерительных трансформаторов тока (ТТ), линейных разъединителей (ЛР) приняты усредненными для оборудования 500 кВ по данным [1].

Известно, что прорывы отрицательных молний на фазный провод ВЛ 500 кВ наиболее вероятны при положительной полярности напряжения на проводе [21,22]. В схеме рис.9 упрощенно не показан источник напряжения промышленной частоты, задающий напряжение фазного провода так, чтобы на момент удара молнии в фазный провод оно соответствовало амплитуде фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети 500 кВ (428 кВ). Далее при расчетах грозовых перенапряжений в РУ совместно с присоединенной ВЛ в ряде случаев учет рабочего напряжения будет произведен (см. схему рис.13).

В общем случае проведение расчетов в схеме рис.9 возможно с учетом различия вольтамперных характеристик установленных защитных аппаратов, однако упрощенно считаем, что все четыре защитных аппарата, показанные на рис.8 и рис.9, имеют близкие друг другу вольтамперные характеристики в режиме ограничения грозовых перенапряжений. Расчеты проведены для значений остающегося напряжения на защитном аппарате (импульс 8/20 мкс амплитудой 10

[illegible]

На рис.10-11 приведены расчетные осциллограммы перенапряжений на стороне 500 кВ автотрансформатора АТ-2 и на измерительном ТН-500 кВ, установленном на ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч», полученные в схеме рис.9 в случае, когда на РУ 500 кВ по ВЛ «Кострома - Луч» набегает косоугольная волна напряжения с амплитудой 2500 кВ и длительностью фронта 1 мкс.

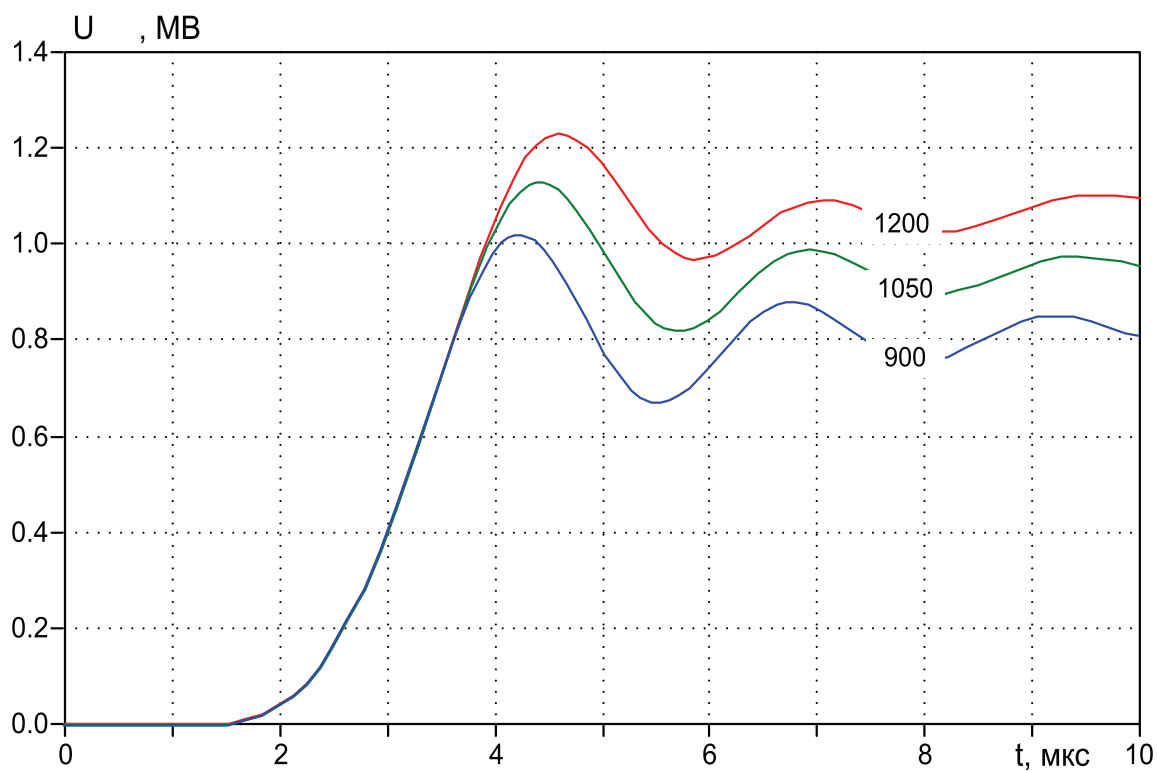


Рис.10. Перенапряжения на АТ-2 в зависимости от защитного уровня всех установленных в РУ защитных аппаратов (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ).

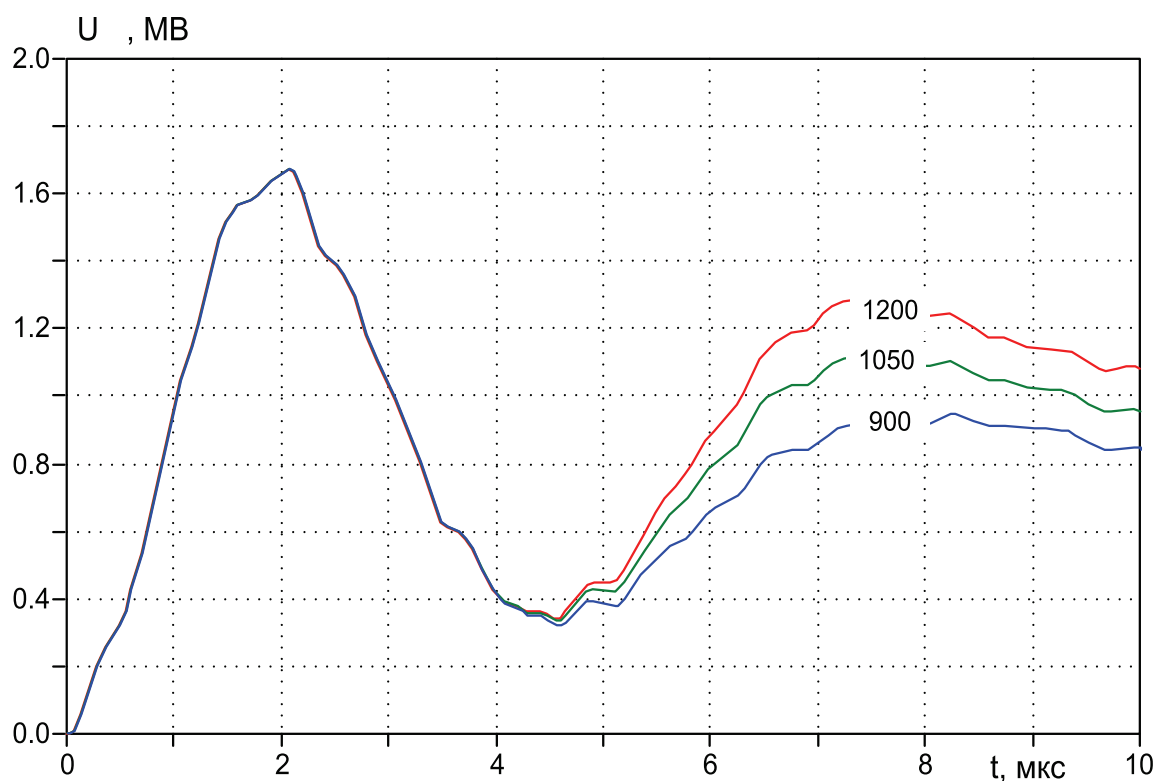


Рис.11. Перенапряжения на ТН в зависимости от защитного уровня всех установленных в РУ защитных аппаратов (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ).

На рис.10 показано, что при снижении защитного уровня ограничителей перенапряжений (разрядников) максимальные перенапряжения на АТ-2 снижаются. На снижение перенапряжений на АТ-2 в первую очередь влияет

снижение остающегося напряжения ближайшего к нему защитного аппарата и, учитывая это, снижение остающегося напряжения защитного аппарата у АТ-2 можно использовать для увеличения расстояния между АТ-2 и его защитным аппаратом. Следовательно, замена вентильных разрядников (прежде всего, разрядника, установленного у АТ) на современные ОПН позволят увеличить допустимые расстояния между АТ и его защитным аппаратом.

На рис.11 показано, что при снижении защитного уровня защитных аппаратов максимальные перенапряжения на ТН не изменяются, а наличие защитных аппаратов сказывается уже после того, как максимум перенапряжений на оборудовании достигнут. Следовательно, замена даже всех вентильных разрядников в РУ на современные ОПН не позволяет увеличивать допустимые расстояния до наиболее удаленного оборудования РУ.

Для того, чтобы учесть все возможные сочетания параметров набегающих на РУ грозовых волн (фронт, амплитуда, наличие среза), расчеты грозовых перенапряжений для РУ 500 кВ ПС «Луч» проведены статистическим методом.

Пусть присоединенные ВЛ 500 кВ выполнены на промежуточных железобетонных опорах типа ПБ-500-1, внешний вид которых [13] приведен на рис.12.

Примем для ВЛ 500 кВ [16]: фазные провода 3хАСО-400, радиус составляющей расщепленного провода $r_0 = 1.38$ см, число составляющих $n = 3$, шаг расщепления $D = 40$ см; марка троса С-70, радиус троса $r = 0.55$ см; расчетная стрела провеса провода $f_{np} = 10.4$ м, расчетная стрела провеса троса $f_{тр} = 7.8$ м; длина пролета 450 м.

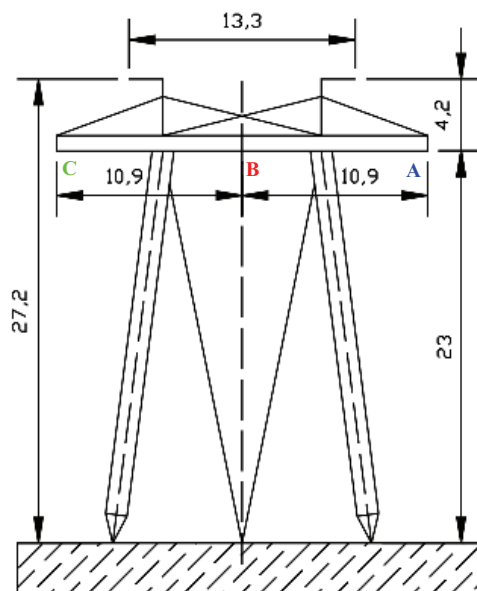


Рис.12. Ж/б опора ВЛ 500 кВ типа ПБ-500-1 по [13].

При статистических расчетах грозовых перенапряжений в РУ схема рис.9 используется совместно с подробной приведенной на рис.13 моделью примыкающего к РУ 500 кВ участка ВЛ 500 кВ, на котором показаны

следующие элементы («жирные» соединительные линии отвечают трехфазным элементам, «тонкие» – однофазным):

- Четыре пролета (каждый пролет разбит на два участка длиной 225 м) ВЛ 500 кВ на опорах ПБ-500-1. Удельное сопротивление грунта вдоль трассы ВЛ 500 кВ принято $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а параметры ВЛ 500 кВ определяются программным комплексом ЕМТР с учетом частотных зависимостей (модель J.Marti [5]) на основе задания геометрических характеристик опоры (рис.12) с учетом стрел провеса проводов и тросов в середине пролета.
- С одной стороны к рассматриваемому участку примыкает «концевой» длинный участок ВЛ для неучета отражений от противоположного по отношению к ПС «Луч» конца ВЛ 500 кВ. С другой стороны к рассматриваемому участку примыкает однофазная схема РУ 500 кВ ПС «Луч» (рис.9), присоединенная к одному из крайних фазных проводов (так как прорывы молнии и обратные перекрытия для ВЛ 500 кВ на опорах ПБ-500-1 практически исключены на средний фазный провод), а два других фазных провода ВЛ 500 кВ заземлены через активное сопротивление, равное волновому сопротивлению ошиновки РУ 500 кВ ($Z = 300 \text{ Ом}$).
- По концам четырех пролетов ВЛ 500 кВ в схему введены модели пяти опор, представляющих из себя набор индуктивностей, величины которых определены с использованием известной геометрии опоры (рис.12) и погонных индуктивностей порталных ж/б опор (0.7 мкГн/м по [1]); каждая опора заземлена через активное сопротивление, $R_z = 20 \text{ Ом}$, если иное не оговорено.
- На каждой из опор фазные провода (условно обозначены «А,В,С») от траверсы отделены гирляндами линейных изоляторов, которые на схеме учтены своими вольт-секундными характеристиками (блоки вольт-секундных характеристик обозначены «I» от англ. «Insulation» – изоляция). В случае превышения воздействующего на изоляцию перенапряжения значения, определяемого по вольт-секундной характеристике, блок фиксирует факт пробоя изоляции и соединяет соответствующий фазный провод с траверсой опоры; блок запускается только в случае превышения напряжения на изоляции минимального значения U_0 , принятого равным 430 кВ (несколько больше амплитуды фазного наибольшего рабочего напряжения сети 500 кВ). Длина гирлянды $L_{из} = 4.0 \text{ м}$ принята по данным [13], а вольт-секундная характеристика в соответствии с выражением (2).
- Блоки, подключаемые через диоды к пораженному молнией крайнему фазному проводу «С», моделирующие импульсную корону на проводах. Блоки представляют собой динамическую емкость коронирующего фазного провода ВЛ 500 кВ на его участке длиной 225 м (половина длины пролета), определяемую на основе мгновенного значения напряжения по (3).

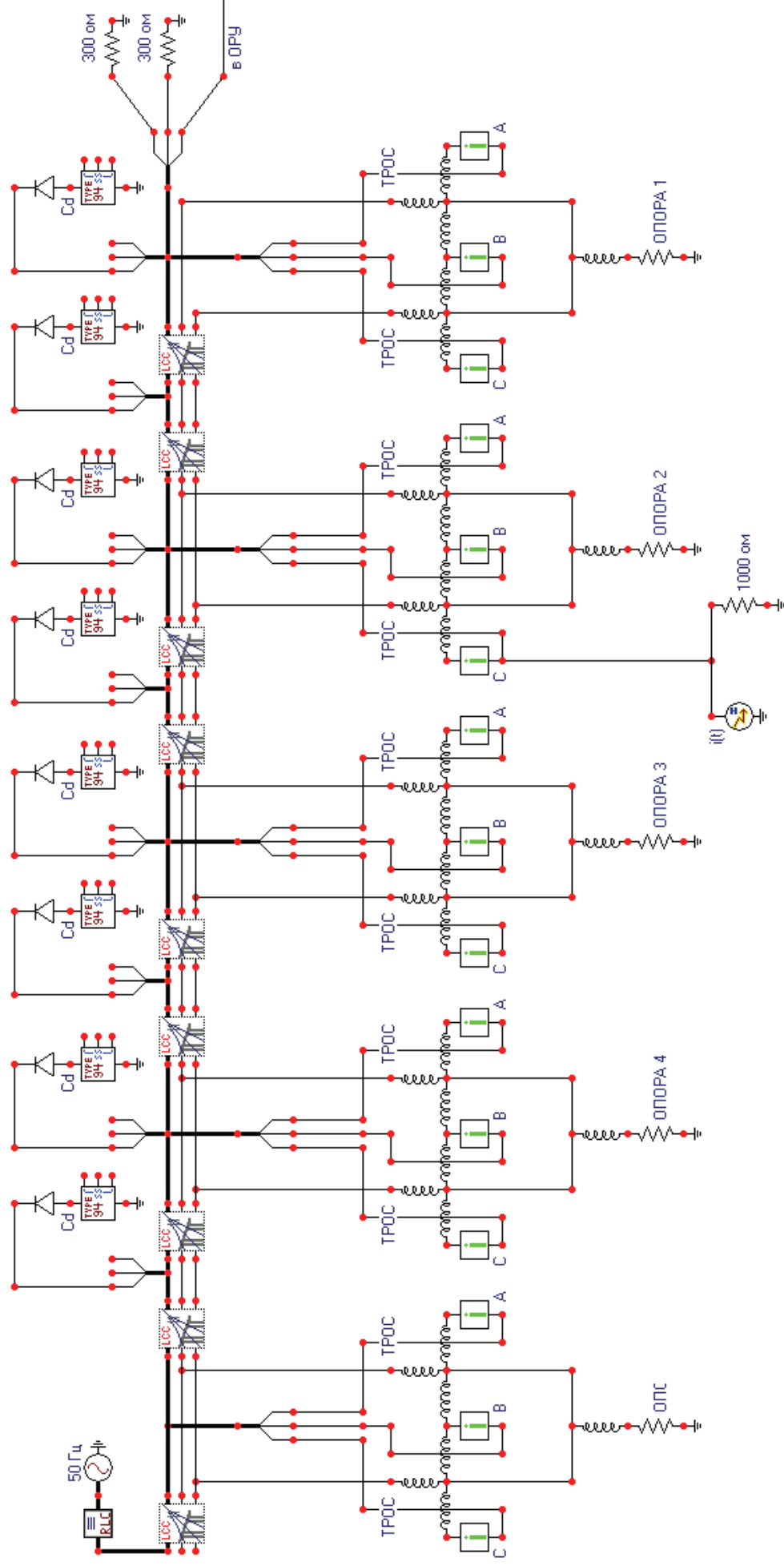


Рис.13. Расчетная ЕМТР модель ВЛ 500 кВ, предназначенная для расчета грозовых перенапряжений на оборудовании РУ 500 кВ (схема рис.9) совместно с процессами в присоединенных линиях.

- Импульсный источник тока молнии, включаемый в место удара (на схеме – это крайний фазный провод «С» на опоре №2). Форма тока задается импульсом (4), у которого принято $n = 5$. Волновое сопротивление канала молнии принято постоянным и равным $Z_m = 1000$ Ом во всем диапазоне токов. Расчеты выполнены для вероятностных распределений параметров токов молнии «НИИПТ» по [1], справедливых для первой компоненты отрицательной молнии, и положено, что амплитуда импульса, фронт и длительность не зависят друг от друга. В ЕМТР импульсный источник тока может быть подключен к ВЛ (к фазному проводу или к тросу) на любом расстоянии x от входа РУ, однако далее упрощенно учтены лишь дискретные значения x , кратные длине пролета 450 м, т.е. рассматриваются удары молнии в трос и фазный провода непосредственно на опоре.

Для ВЛ 500 кВ импульсная прочность линейной изоляции достаточно велика, и поэтому обратные перекрытия при ударах молнии в заземленные тросы практически исключены при сопротивлениях заземления опор менее 20 Ом [1], а расчетным случаем для ВЛ 500 кВ при таких сопротивлениях заземления является прорыв молнии сквозь тросовую защиту на фазные провода. Для случая удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на рис.14-16 в качестве примера приведены распределения вероятности появления перенапряжений выше заданного значения (откладываемого по оси абсцисс) для для АТ-2 и ТН, установленного на ВЛ «Кострома - Луч».

В статистических расчетах, проводимых в ЕМТР, наиболее интересна координата по оси вероятностей точки пересечения получаемого распределения максимальных значений грозových перенапряжений на изоляции оборудования с допустимыми для этой изоляции значениями. Исследования на модели в ЕМТР показали, что для получения этой координаты в большинстве случаев достаточно проводить всего 1000 экспериментов, и, поэтому, на рис.14-16 и в дальнейшем каждая из кривых получена по результатам статистических расчетов перенапряжений, вызванных 1000 ударами молнии в рассматриваемую точку присоединенной к подстанции ВЛ, что соответствует минимальной вероятности $P = 0.001$ по оси ординат.

Допустимые уровни грозových перенапряжений на изоляции оборудования получены по (1) и приведены в табл.2, но далее, не теряя общности рассуждений, примем во внимание только оборудование с полной изоляцией (класс изоляции «Б»), для которого на рис.14-16 нанесены допустимые уровни грозových перенапряжений: для измерительных ТН – $U_{дон} = 1568$ кВ; для АТ и НДЕ – $U_{дон} = 1430$ кВ.

Представленные на рис.14-16 зависимости были получены в предположении, что все четыре комплекта защитных аппаратов, установленных в РУ 500 кВ, имеют одинаковые вольтамперные характеристики: для рис.14-15 остающееся напряжение на импульсе 8/20 мкс амплитудой 10 кА составляет 1200 кВ; для рис.16 остающееся напряжение варьировалось (900, 1050, 1200 кВ).

Таблица 2. Испытательные напряжения полного грозового импульса оборудования класса 500 кВ по ГОСТ 1516.3-96 и допустимые грозовые перенапряжения, определенные по рекомендациям [11].

Оборудование	Напряжение полного грозового импульса, кВ			
	Испытательное		Допустимое	
	Класс изоляции			
	«А»	«Б»	«А»	«Б»
силовые трансформаторы	1300	1550	1155	1430
электромагнитные ТН	1425	1675	1293	1568
НДЕ, ТТ, аппараты	1425	1550	1293	1430

Из рис.14 видно влияние импульсной короны на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 500 кВ, учет которой приводит к существенному снижению вероятности возникновения опасных перенапряжений для всего оборудования РУ, а особенно – для наименее защищенного оборудования (электромагнитного трансформатора напряжения ТН-500 на ВЛ «Кострома - Луч») – от значения $P = 0.26$ до $P = 0.057$, т.е. почти в пять раз.

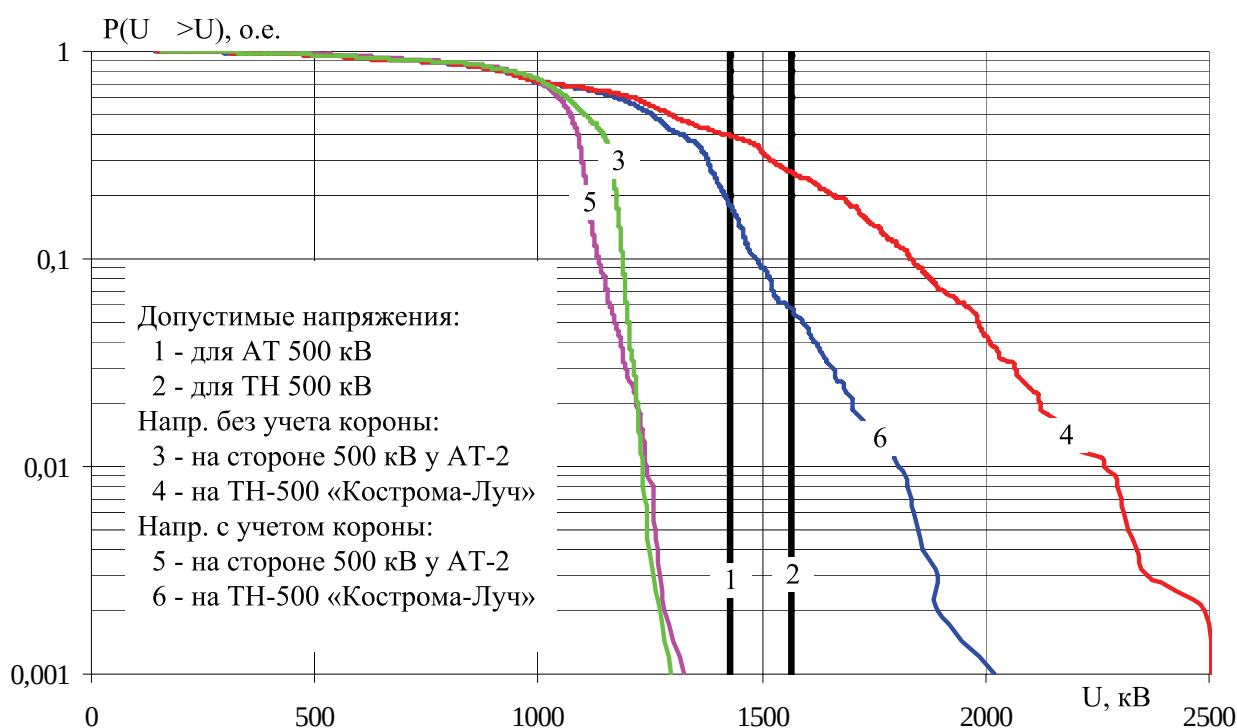


Рис.14. Влияние импульсной короны на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 500 кВ (рассмотрены удары молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на расстоянии 450 м от входа ПС «Луч»; не учитывается рабочее напряжение на проводах ВЛ и РУ).

На рис.15 показано влияние начального рабочего напряжения на проводах ВЛ 500 кВ и РУ 500 кВ в момент удара молнии (отрицательной полярности) в присоединенную к РУ линию. Учет наиболее неблагоприятной величины

рабочего напряжения (для сети 500 кВ это +428 кВ) приводит к увеличению вероятности возникновения опасных перенапряжений для всего оборудования РУ, а особенно – для наименее защищенного оборудования (электромагнитного трансформатора напряжения ТН-500 на ВЛ «Кострома - Луч») – от значения $P = 0.057$ до $P = 0.08$, т.е. практически в полтора раза.

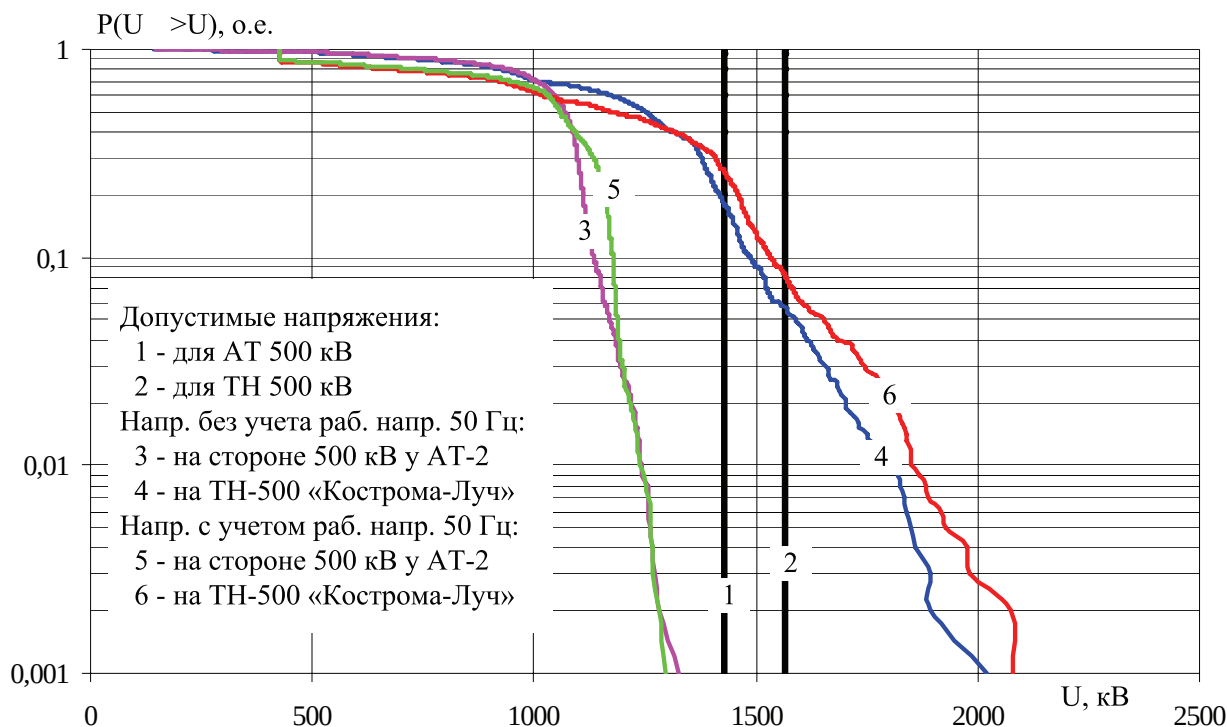


Рис.15. Влияние рабочего напряжения положительной полярности (+428 кВ) на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 500 кВ (рассмотрены удары отрицательной молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на расстоянии 450 м от входа ПС «Луч»; учтена импульсная корона на проводах ВЛ).

Приведенные на рис.16 распределения вероятностей появления максимальных грозовых перенапряжений на изоляции АТ-2 (кривые 3,4,5) и на изоляции ТН-500 (кривые 6,7,8), получены при варьировании вольтамперной характеристики защитных аппаратов, принятой одинаковой для всех четырех аппаратов, установленных в РУ 500 кВ (на импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой 10 кА остающееся напряжение составляет 1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ). Из рис.16 видно, что снижение остающегося напряжения защитных аппаратов приводит к снижению уровня максимальных грозовых перенапряжений на АТ, однако снижения уровня максимальных грозовых перенапряжений на удаленном от защитных аппаратов оборудовании (на ТН-500 кВ «Кострома - Луч») практически не происходит, т.е. надежность защиты от перенапряжений удаленного оборудования не изменяется.

На основе результатов расчетов, проиллюстрированных рис.16, а также осциллограммами рис.10-11, сделаны следующие обобщающие выводы:

- при снижении остающегося напряжения защитных аппаратов, установленных в РУ, максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании снижаются;

- степень снижения грозовых перенапряжений на оборудовании (при заданном снижении остающегося напряжения защитных аппаратов) зависит от удаленности этого оборудования от защищенных аппаратов;
- наибольшее снижение перенапряжений достигается для силовых трансформаторов и автотрансформаторов, так как они наиболее близко расположены к защитным аппаратам;
- минимальное снижение перенапряжений характерно для наиболее удаленного от защитных аппаратов оборудования РУ.

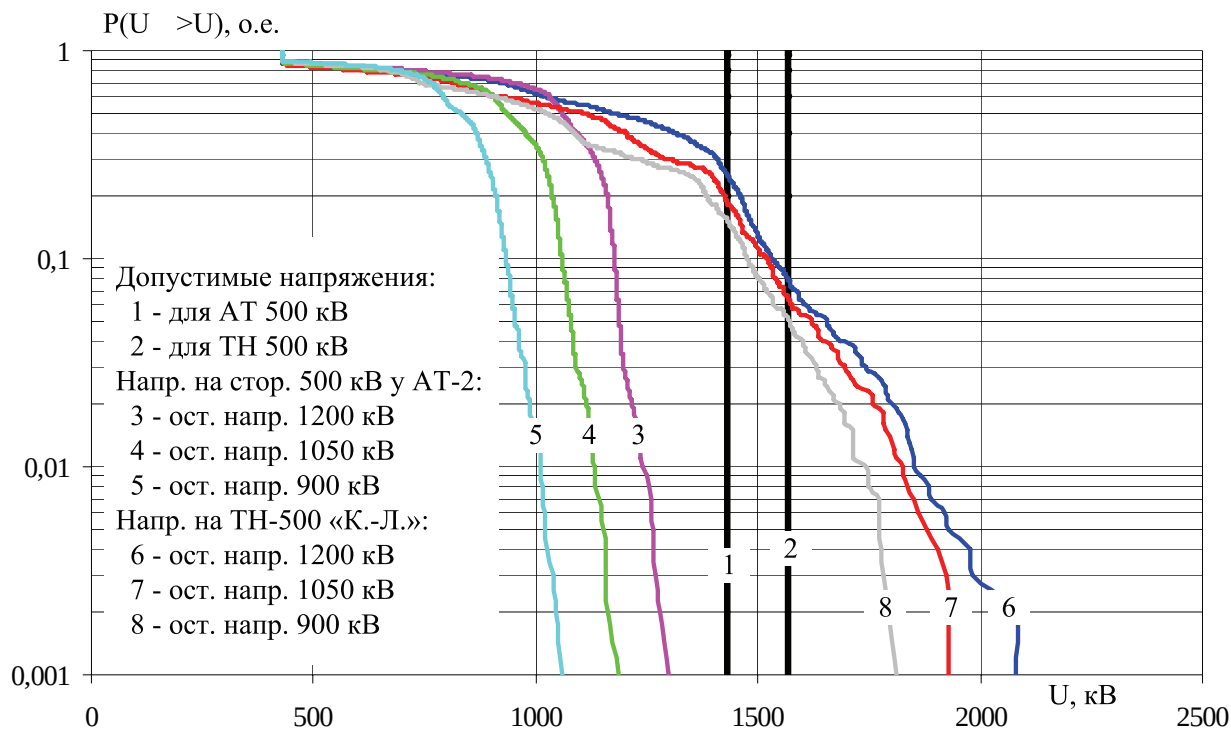


Рис.16. Влияние остающегося напряжения защитных аппаратов на максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 500 кВ (рассмотрены удары отрицательной молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на расстоянии 450 м от входа ПС «Луч»; учтено возникновение импульсной короны на проводах ВЛ и рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и РУ).

3.2. Расчет необходимой длины тросового подхода ВЛ

Расчеты грозовых перенапряжений (рис.16) показали, что наименее защищенным оборудованием РУ 500 кВ при ударах молнии в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» является измерительный трансформатор ТН-500 «Кострома - Луч». Аналогично приведенным на рис.16 результатам можно показать, что при ударах молнии в ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» наименее защищенным оборудованием РУ 500 кВ является измерительный трансформатор емкостного типа НДЕ-500 «Луч - Нижегородская».

Влияние удаленности места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на наименее защищенном оборудовании РУ 500 кВ отражено на рис.17 (удар в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч») и рис.18 (удар молнии в ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская»). При получении рис.17-18 было принято, что все четыре комплекта защитных аппаратов, установленных в РУ 500

кВ, имеют одинаковые вольтамперные характеристики (остающееся напряжение на импульсе 8/20 мкс амплитудой 10 кА составляет 1200 кВ).

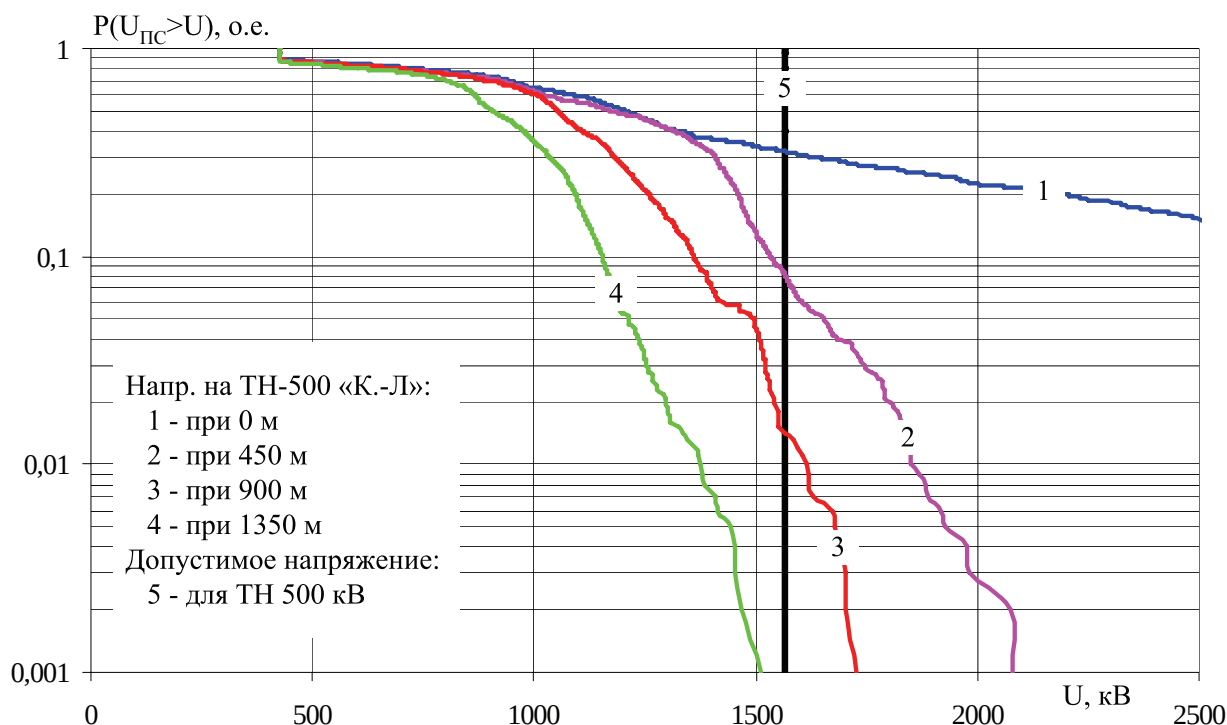


Рис.17. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции ТН-500 «Кострома - Луч» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и РУ).

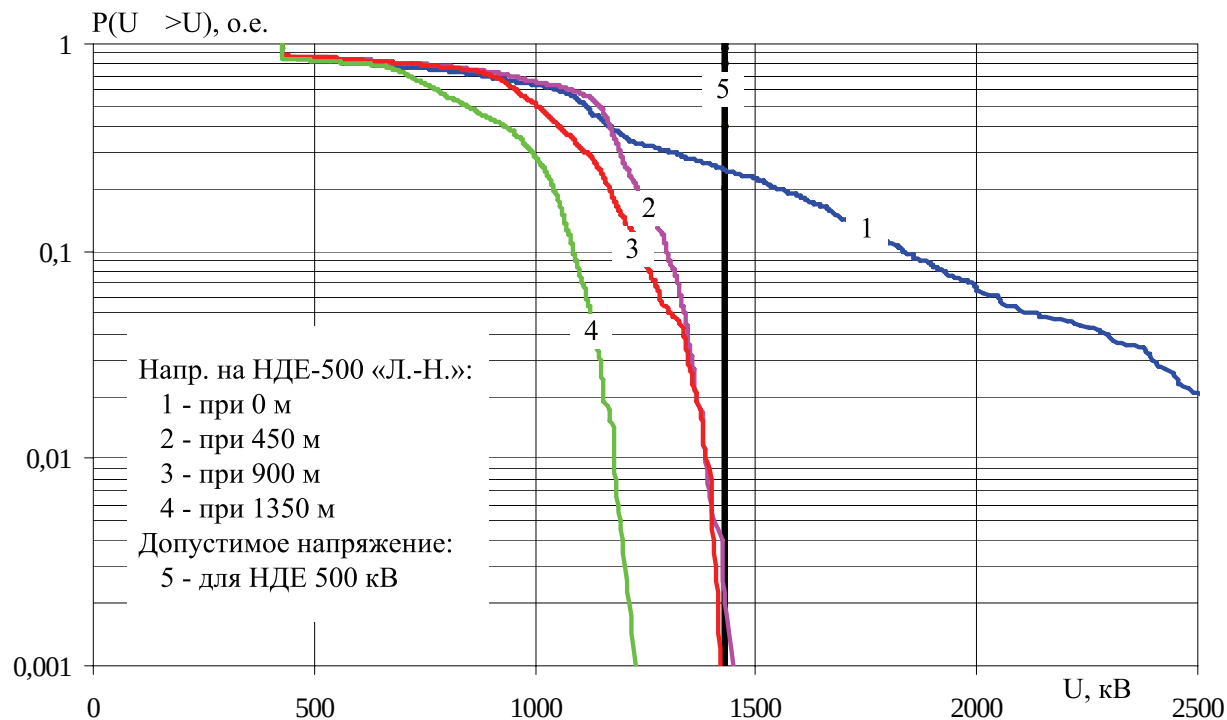


Рис.18. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции НДЕ-500 «Луч - Нижегородская» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и РУ).

На рис.17-18 показано, что максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 500 кВ возникают при наиболее близких к РУ ударах молнии в присоединенные ВЛ 500 кВ. С увеличением расстояния от места удара молнии в ВЛ 500 кВ до РУ максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 500 кВ снижаются, что соответствует уменьшению вероятности появления опасного для изоляции грозового перенапряжения.

В расчетной модели при ударах молнии в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» (рис.17) на расстоянии более 1350 м от входа РУ грозовые перенапряжения на наименее защищенном оборудовании РУ 500 кВ ни в одном из случаев не превосходили допустимого для изоляции уровня. При ударах в ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» (рис.18) соответствующее расстояние меньше и находится в диапазоне 450-900 м, что обусловлено наличием в линейной ячейке этой ВЛ 500 кВ защитного аппарата.

Проведенные расчеты, проиллюстрированные рис.17-18 на примере РУ 500 кВ, позволяют сделать следующие выводы:

- наибольшую опасность для оборудования РУ представляют грозовые перенапряжения, вызванные ударами молнии в фазные провода присоединенных ВЛ на расстоянии не более 500-1500 м от РУ (длина так называемого «опасного» подхода);
- удары молнии в фазные провода ВЛ на расстоянии более 500-1500 м практически не способны вызвать опасных грозовых перенапряжений на оборудовании РУ;
- для снижения числа прямых ударов молнии в фазные провода, а значит и числа опасных грозовых перенапряжений на оборудовании РУ, на длине «опасного» подхода ВЛ к РУ необходима установка тросовой защиты;
- увеличение длины тросового подхода ВЛ к РУ свыше длины «опасного» подхода не изменяет (не повышает) защищенности оборудования РУ от грозовых перенапряжений;
- наименьшая длина «опасного» подхода ВЛ к РУ необходима на тех присоединенных ВЛ, в линейных ячейках которых установлены защитные аппараты (разрядники или ОПН); на подходах таких ВЛ допустимо не устанавливать трос, так как ОПН линейной ячейки берет на себя выполнение роли троса по снижению числа опасных волн, проходящих на подстанцию.

3.3. Каскадные схемы защиты оборудования и их эффективность

На рис.19 в зависимости от удаленности места удара молнии в ВЛ 500 кВ показано изменение вероятности превышения грозовыми перенапряжениями допустимого для изоляции уровня (кривые 1 и 3, приведенные на рис.19, получены с использованием данных рис.17 и рис.18 соответственно).

В соответствии с выражением (5), в котором для РУ 500 кВ могут быть исключены слагаемые от обратных перекрытий на присоединенных ВЛ 500 кВ (при сопротивлениях заземления опор менее 20 Ом), оценка защищенности оборудования РУ 500 кВ от грозовых перенапряжений при ударах в фазные провода ВЛ 500 кВ пропорциональна площади $\overline{P}_{np}^i$ ($i = 1, 2$) под кривыми на рис.19,

а наибольшая защищенность от грозовых перенапряжений будет у того оборудования, для которого рассматриваемая площадь минимальна. Площади под кривыми 1-4 (рис.19) приведены в табл.3.

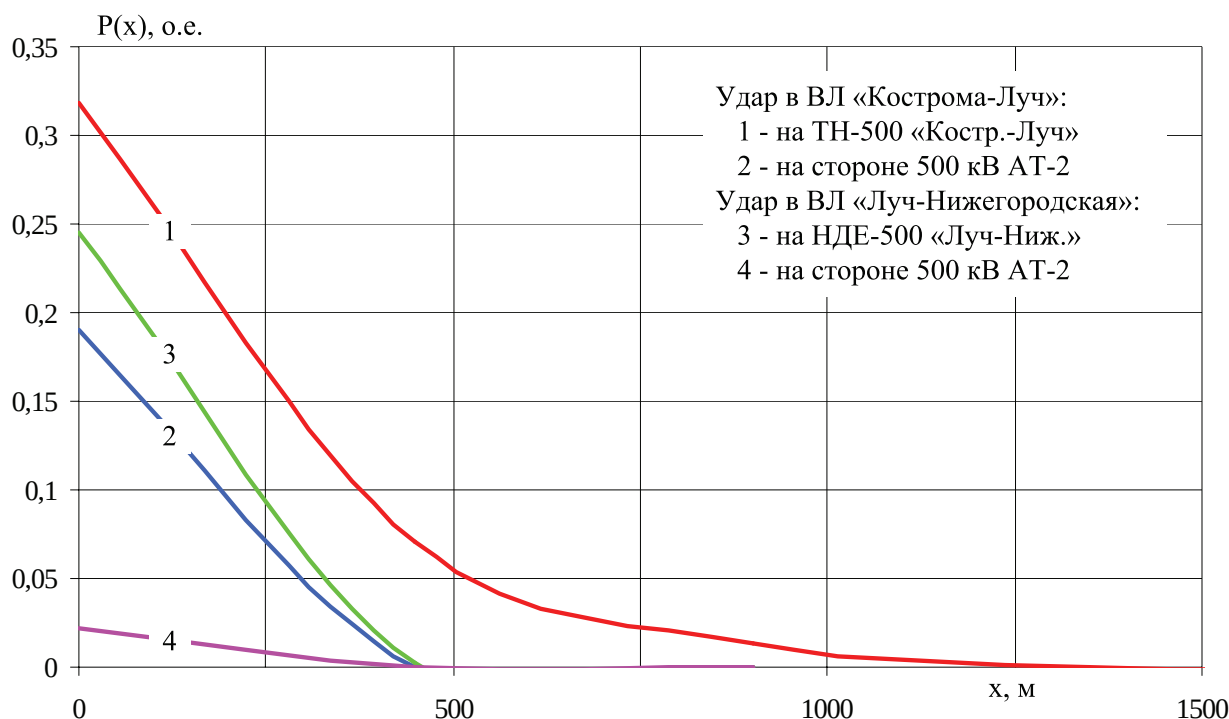


Рис.19. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в фазный провод присоединенных ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции оборудования РУ 500 кВ (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; учтено рабочее напряжение +428 кВ на проводах ВЛ и РУ).

Таблица 3. Площадь (о.е.×м) под кривыми 1-4 (рис.19).

номер кривой по рис.19	удар молнии в фазный провод ВЛ 500 кВ	оборудование ОРУ 500 кВ	площадь под кривой
1	"Кострома - Луч"	ТН-500	110
2		АТ-2	43
3	"Луч - Нижегородская"	НДЕ-500	55
4		АТ-2	5

На основе анализа табл.3 и рис.19 можно сказать, что:

- наименее защищенным оборудованием РУ является оборудование линейных ячеек присоединенных ВЛ (при отсутствии в них защитных аппаратов);
- наличие в линейной ячейке присоединенной ВЛ защитного аппарата (разрядника или ОПН) повышает защищенность от грозовых перенапряжений установленного в ней оборудования (для РУ 500 кВ ПС «Луч» в 2 раза согласно табл.3);

- наличие в линейной ячейке присоединенной ВЛ защитного аппарата существенно повышает защищенность установленных в РУ силовых трансформаторов и автотрансформаторов от грозовых перенапряжений, вызванных ударами молнии в эту ВЛ (для РУ 500 кВ ПС «Луч» в 8-9 раз согласно табл.13);
- наиболее защищенным от грозовых перенапряжений будет оборудование того РУ, в котором в линейных ячейках присоединенных ВЛ установлены защитные аппараты; в таких РУ практически исключены повреждения изоляции силовых трансформаторов и автотрансформаторов от грозовых перенапряжений, вызванных набегающими с присоединенных ВЛ грозовыми волнами.

Схема рис.20 защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений, когда по ходу набегающей с ВЛ грозовой волны последовательно установлены два защитных аппарата (один – в линейной ячейке или на сборных шинах, второй – у трансформатора или автотрансформатора), называется «каскадной» и, как показали исследования, является очень эффективной для защиты оборудования от грозовых перенапряжений и особенно эффективной при $L_1 > L_2$.

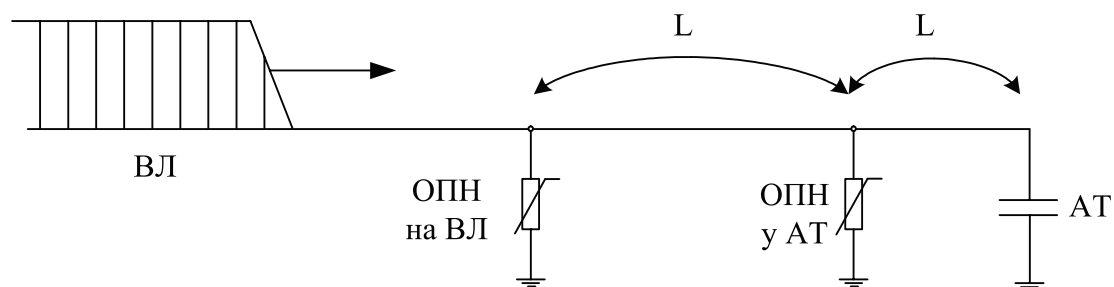


Рис.20. Каскадная схема защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений, вызванных набегающими с ВЛ грозовыми волнами.

3.4. Учет обратных перекрытий на присоединенных ВЛ

Удары молнии в заземленные тросы ВЛ 500 кВ не приводят к обратным перекрытиям с опоры на фазные провода при сопротивлениях заземления опор, меньших 20 Ом. Как правило, на подходах ВЛ к РУ стремятся обеспечить сопротивления заземления опор ВЛ, не превосходящие 10-20 Ом [3], однако известны случаи, когда не удается обеспечить низких сопротивлений заземления опор ВЛ на подходах РУ. В таких случаях при расчетах грозовых перенапряжений на оборудовании РУ, вызванных ударами в присоединенные ВЛ, необходимо учитывать обратные перекрытия на фазные провода на подходах к РУ.

Удары молнии в трос в средней части пролета ВЛ могут приводить к обратным перекрытиям на опоре с заметно меньшей вероятностью, чем при ударах молнии в опору или трос вблизи нее. Поэтому далее упрощенно не рассмотрены удары молнии в трос в средней части пролета, а все внимание сосредоточено на ударах молнии непосредственно в опору (удаленность x места удара молнии в ВЛ от входа РУ кратна длине пролета).

Аналогично случаю удара молнии в фазный провод на рис.21 (удар в ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч») и рис.22 (удар молнии в ВЛ 500 кВ «Луч -

Нижегородская) рассмотрено влияние удаленности места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на наименее защищенном оборудовании РУ 500 кВ. При получении рис.21-22 было принято, что все четыре комплекта защитных аппаратов, установленных в РУ 500 кВ, имеют одинаковые вольтамперные характеристики (остающееся напряжение на импульсе 8/20 мкс амплитудой 10 кА составляет 1200 кВ), а сопротивление заземления всех опор ВЛ, в отличие от ранее рассмотренных случаев, составляет $R_3 = 50$ Ом.

На рис.23 в зависимости от удаленности места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ показано изменение вероятности превышения грозовыми перенапряжениями допустимого для изоляции уровня (кривые 1 и 3, приведенные на рис.23, получены с использованием данных рис.21 и рис.22 соответственно). Площади под кривыми 1-4 (рис.23) приведены в табл.4.

Таблица 4. Площадь (о.е.×м) под кривыми 1-4 (рис.23).

номер кривой по рис.23	удар молнии в трос на опоре ВЛ 500 кВ	оборудование РУ 500 кВ	площадь под кривой
1	"Кострома - Луч"	ТН-500	34
2		АТ-2	10
3	"Луч - Нижегородская"	НДЕ-500	22
4		АТ-2	1

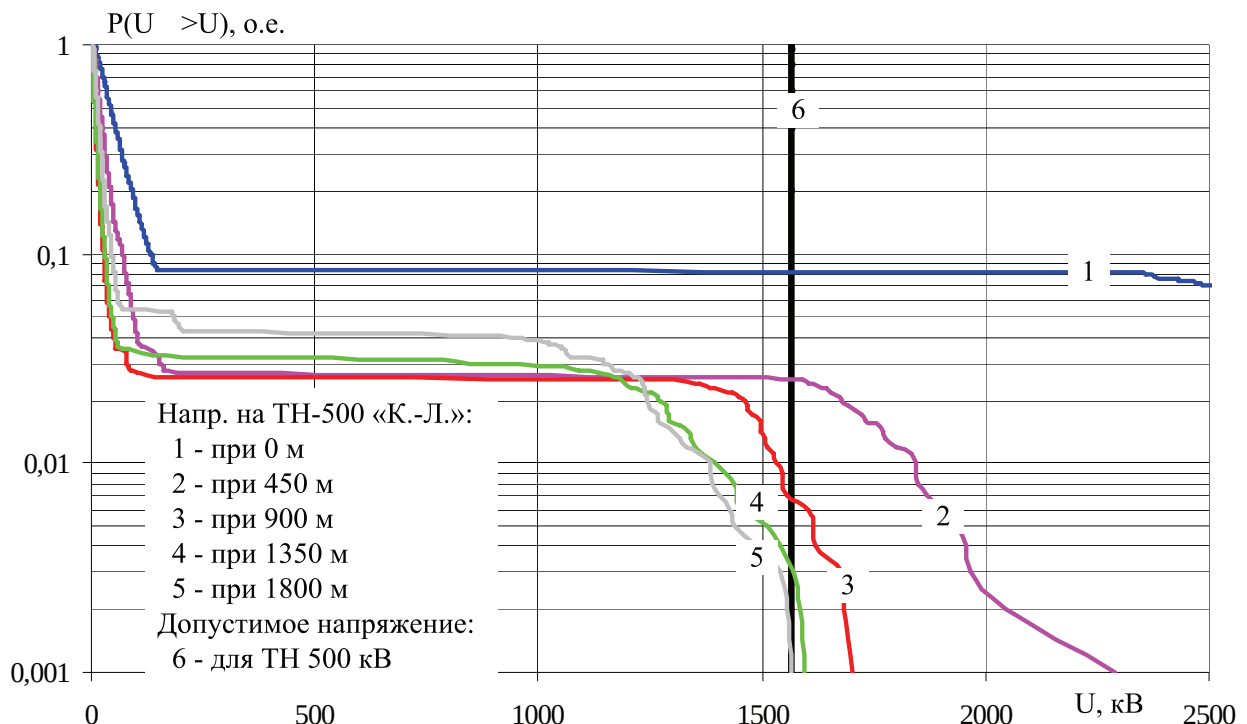


Рис.21. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ «Кострома - Луч» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции ТН-500 «Кострома - Луч» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; рабочее напряжение на проводах ВЛ и РУ не учтено; $R_3 = 50$ Ом).

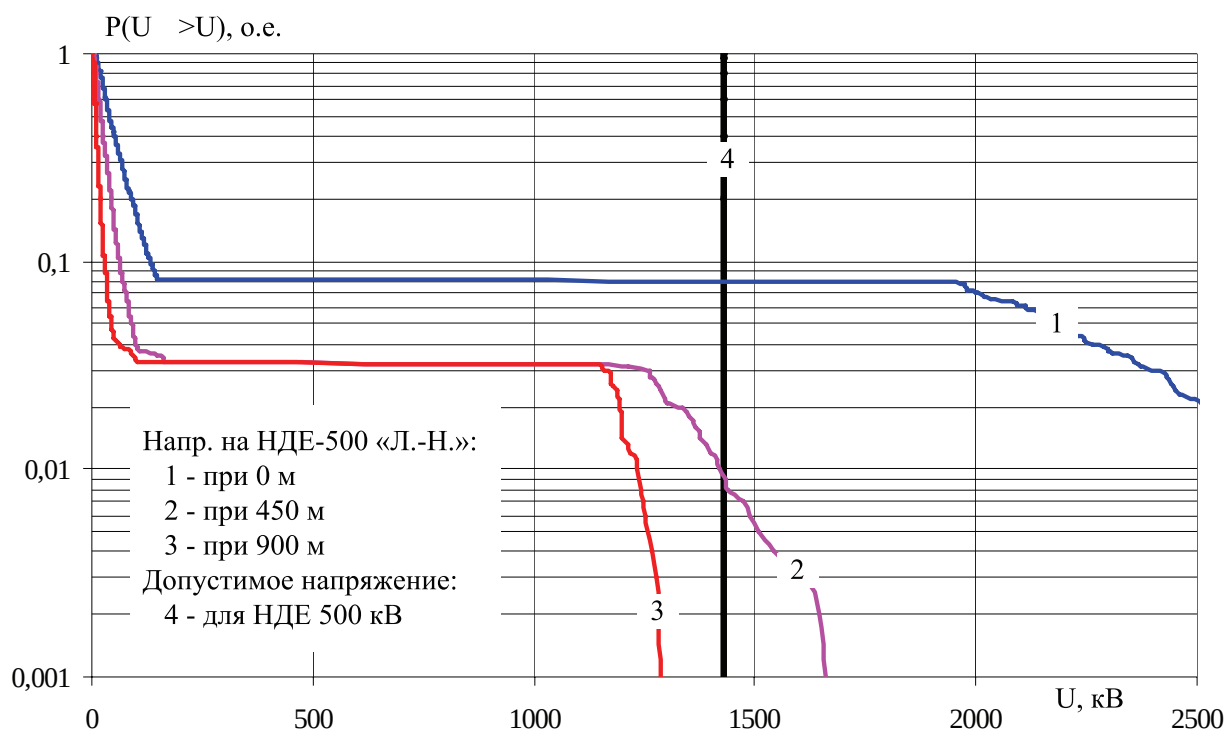


Рис.22. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в опору ВЛ 500 кВ «Луч - Нижегородская» на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции НДЕ-500 «Луч - Нижегородская» (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; рабочее напряжение на проводах ВЛ и РУ не учтено; $R_3 = 50 \text{ Ом}$).

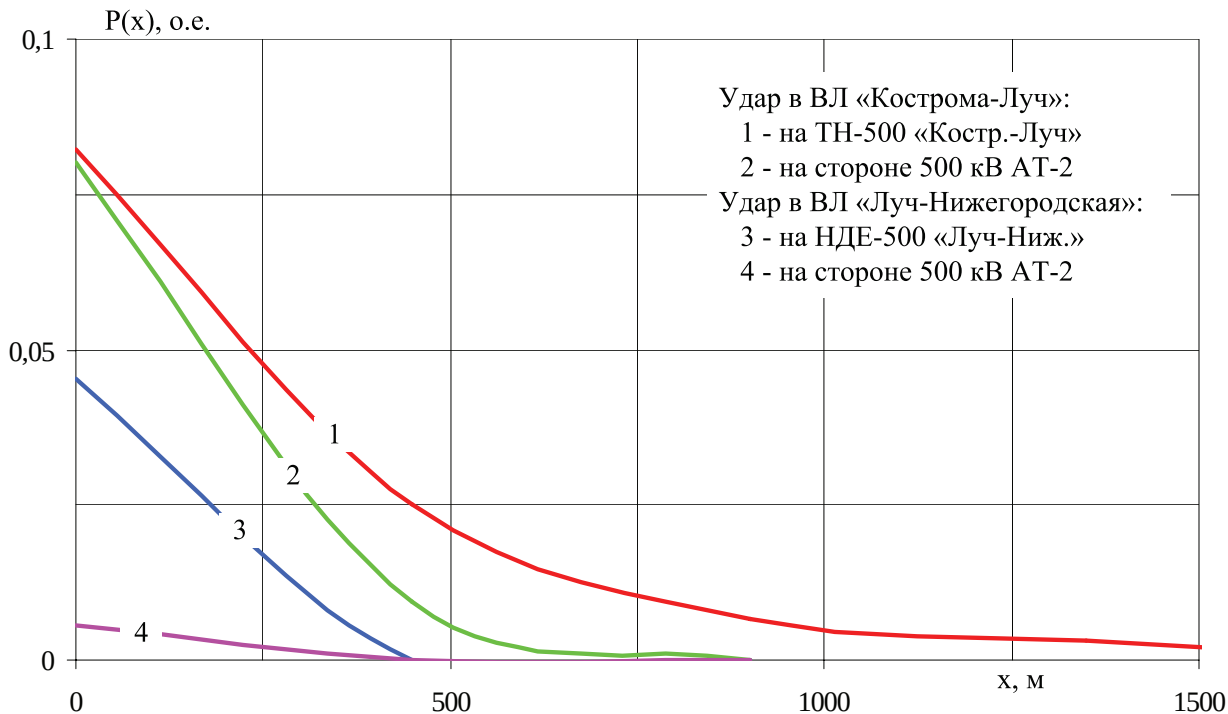


Рис.23. Влияние удаленности от входа ПС «Луч» места удара молнии в опору присоединенных ВЛ 500 кВ на максимальные грозовые перенапряжения на изоляции оборудования РУ 500 кВ (учтена импульсная корона на проводах ВЛ; рабочее напряжение на проводах ВЛ и РУ не учтено; $R_3 = 50 \text{ Ом}$).

На основе анализа табл.4 и рис.23, учитывая данные [1], свидетельствующие о существенном влиянии сопротивления заземления опор различной конструкции на число обратных перекрытий при ударах молнии опоры и тросы, сделаны следующие выводы (в дополнение к выводам на основе табл.3):

- число набегающих на РУ грозовых волн, вызванных ударами молнии в опоры и тросы присоединенных ВЛ, существенно зависит от сопротивления заземления опор на подходах ВЛ к РУ; следовательно, защищенность оборудования РУ от грозовых перенапряжений так же существенно зависит от сопротивления заземления опор на подходах ВЛ к РУ;
- так как число ударов молнии в опоры и тросы по крайней мере на порядок больше числа прорывов молнии на фазные провода, то важнейшей задачей защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений является обеспечение как можно более низких сопротивлений заземления опор ВЛ на подходах к РУ;
- наиболее важно обеспечение минимальных сопротивлений заземления 2-3 ближайших к РУ опор присоединенных ВЛ;
- в случае невозможности обеспечения малых сопротивлений заземления ближайших к РУ опор присоединенной ВЛ высокой защищенности оборудования РУ от грозовых перенапряжений можно достичь установкой защитного аппарата (разрядника или ОПН) в линейной ячейке этой ВЛ.

3.5. Оценка числа лет безаварийной работы оборудования при грозовых перенапряжениях

Согласно рекомендациям [1] для ВЛ 500 кВ на промежуточных опорах типа ПБ-500-1 определены следующие необходимые для расчета по (5) величины: $N = 84$ удара на 100 км длины ВЛ и 100 грозовых часов; относительное число (вероятность) прорывов молнии на фазные провода $n_{np} = 0.0052$ о.е.; относительное число ударов молнии в опору $n_{опора} = 0.24$ о.е. и в трос $n_{трос} = 0.76$ о.е. Исходные данные для расчета по (5) приведены в табл.5, которая составлена на основе табл.3-4 и рис.19, рис.23, а результаты расчетов содержатся в табл.6.

Таблица 5. Исходные данные для расчета по (5) для наименее защищенного от грозовых перенапряжений оборудования РУ 500 кВ ПС «Луч».

i	удар молнии в ВЛ 500 кВ	оборудование	$l_{опасн}^i$, км	$l_{опасн}^i \cdot \overline{P}_{пр}^i$, о.е.×км	$l_{опасн}^i \cdot \overline{P}_{опора}^i$, о.е.×км		$l_{опасн}^i \cdot \overline{P}_{трос}^i$, о.е.×км
					<20 Ом	50 Ом	
1	"Кострома - Луч"	ТН-500	1,35	0,110	0	0,034	0
2	"Луч - Нижегород."	НДЕ-500	0,45	0,055	0	0,022	0

Общий уровень защищенности РУ от грозовых перенапряжений определяется наиболее удаленным от защитных аппаратов оборудованием – измерительными трансформаторами напряжения ТН-500 и НДЕ-500, и поэтому в результате расчетов грозовых перенапряжений важно оценить достаточность

защищенности именно указанного оборудования. Для этого полученные в табл.6 оценки M защищенности оборудования от грозовых перенапряжений сопоставлены с рекомендуемыми уровнями.

Таблица 6. Оценка по (5) защищенности от грозовых перенапряжений наименее защищенного оборудования РУ 500 кВ ПС «Луч» (при $T_q = 100$ часов в год).

i	удар молнии в ВЛ	оборудование	R_3 , Ом	n , 1/год	M , лет
1	"Кострома - Луч"	ТН-500	<20	0,00048	2100
			50	0,00733	140
2	"Луч - Нижегородская"	НДЕ-500	<20	0,00024	4160
			50	0,00468	210

Рекомендуемый [1] показатель надежности грозозащиты наиболее дорогого и ответственного подстанционного оборудования 500 кВ (силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) составляет $M = 800 \div 1000$ лет. Рекомендаций относительно значений M для трансформаторов напряжения 500 кВ в [1] нет, так же как их нет и для другого оборудования помимо «наиболее ответственного». Это означает, что основное внимание в [1] уделяется защите от грозовых перенапряжений наиболее дорогостоящего оборудования РУ, которым и являются силовые трансформаторы и автотрансформаторы.

Представленные в [1] рекомендации относительно достаточных величин показателя M основаны на приемлемом для энергосистемы числе повреждений наиболее дорогостоящего оборудования от грозовых перенапряжений в год. Однако, перерывы в снабжении потребителей электрической энергией могут быть вызваны повреждением не только силовых трансформаторов и автотрансформаторов, но и любого другого оборудования РУ, а с этих позиций экономически целесообразный уровень надежности защиты от грозовых перенапряжений должен быть достаточно высоким не только для наиболее дорогого оборудования РУ, но и для всей подстанции в целом. Например, если на РУ учесть большое число трансформаторов тока, которые являются важнейшими в организации релейной защиты всей РУ и присоединенных ВЛ, то требуемый уровень защищенности каждого из них будет даже выше, чем для установленных силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

Учитывая изложенное, а также большое число влияющих на результаты расчетов M исходных данных, достоверное знание и задание которых невозможно, в настоящее время в определенной мере назрел вопрос об изменении подходов к выбору схем защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений. Новые схемы защиты оборудования от грозовых перенапряжений, построенные с использованием современных защитных аппаратов типа ОПН, должны обеспечивать повышенную надежность всего оборудования РУ, а не только силовых трансформаторов. Как уже было показано, в качестве наиболее эффективных схем защиты оборудования РУ грозовых перенапряжений следует признать каскадные (рис.20).

4. АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИХ КОРРЕКТИРОВКЕ

4.1. Анализ требований ПУЭ в части грозозащиты РУ

Замена РВ на ОПН. Изначально требования ПУЭ [3] в части грозозащиты РУ были сформулированы для случаев применения в качестве защитных аппаратов вентильных разрядников. В настоящее время основным защитным аппаратом от грозовых и коммутационных перенапряжений является ОПН [1,2,24-28]. Для случаев применения ОПН в ПУЭ расстояния, полученные для вентильных разрядников, предлагается пересчитывать соразмерно с защитными характеристиками ОПН (остающим напряжением в режиме ограничения грозовых перенапряжений).

В последней редакции ПУЭ в главе 4 в примечаниях к табл.4.2.10 (допустимые расстояния от вентильных разрядников до защищаемого оборудования) указано, что:

«При использовании ОПН вместо РВ или при изменении испытательных напряжений защищаемого оборудования расстояние до силовых трансформаторов или другого электрооборудования определяется по формуле

$$L_{\text{ОПН}} = L_{\text{РВ}} \frac{U_{\text{ИСП}} - U_{\text{ОПН}}}{U_{\text{ИСП}} - U_{\text{РВ}}},$$

где $L_{\text{ОПН}}$ - расстояние от ОПН до защищаемого оборудования, м; $L_{\text{РВ}}$ - расстояние от разрядника до защищаемого оборудования, м; $U_{\text{ИСП}}$ - испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе, кВ; $U_{\text{ОПН}}$, $U_{\text{РВ}}$ - остающееся напряжение на ОПН (РВ) при токе 5 кА - для классов напряжения 110-220 кВ; 10 кА - для классов напряжения 330 кВ и выше».

В условиях РУ 500 кВ ПС «Луч» для наиболее удаленного оборудования (ТН-500 кВ на ВЛ «Кострома - Луч») по ПУЭ имеем: $U_{\text{ИСП}} = 1550$ кВ; $U_{\text{РВ}} = 1200$ кВ; $U_{\text{ОПН}} = 900$ кВ; допустимо увеличение расстояний в $K = 1.86$ раза. Однако, как видно из рис.11 и рис.16, максимальные грозовые перенапряжения на удаленном оборудовании РУ (для ПС «Луч» 200 метров) практически не зависят от остающегося напряжения на защитных аппаратах, установленных в РУ, и, следовательно, расстояния до защитных аппаратов не могут быть увеличены (после замены РВ на ОПН), так как это снизит защищенность удаленного оборудования от грозовых перенапряжений [29].

Приведенная в ПУЭ формула достаточно точна в случае, когда пересчитывается расстояние от трансформатора до его защитного аппарата исчисляемое десятками метров. Наибольшую же ошибку, как показано выше, приведенная в ПУЭ формула дает при пересчете расстояний до наиболее удаленного оборудования подстанции (при расстояниях более 100 метров). Учитывая изложенное, при замене разрядников на ОПН рекомендуется использовать формулу ПУЭ только при пересчете расстояний до силовых трансформаторов, автотрансформаторов, но не до наиболее удаленного оборудования РУ (оборудования линейных ячеек), расположенного до защитного аппарата (РВ или ОПН) по ходу набегающих с присоединенных ВЛ грозовых волн.

В подтверждение состоятельности высказанных предложений выступает примечание к табл.4.2.8 в главе 4 из ПУЭ-6:

*«При использовании разрядников I группы вместо разрядников II группы по ГОСТ 16357-70 * расстояния до силовых трансформаторов 150-220 кВ с уровнем изоляции по ГОСТ 1516.1-76 * могут быть увеличены в 1,5 раза».*

Это примечание еще раз показывает, что при использовании у трансформатора защитного аппарата со сниженным остающимся напряжением пересчитывать расстояние можно только до силового трансформатора, а не для всего оборудования РУ, как это делается в ПУЭ-7 [3] и Указаниях [24].

Длина тросового подхода. ПУЭ обязывает обустроить защищенный тросами подход ВЛ к РУ длиной вплоть до 3-4 км. Расчетами показано, что такое требование является избыточным, а при использовании каскадных схем защиты оборудования от грозовых перенапряжений можно снизить длину тросового подхода до 500-1500 м или вовсе отказаться от установки троса (для некоторых РУ 35-110 кВ). Поэтому предлагается в ПУЭ добавить пункт, который допускает снижать длину тросового подхода ВЛ в случае установки дополнительных ОПН в ее линейную ячейку.

Активность грозовой деятельности. Согласно [30] требования ПУЭ к расстояниям до защитных аппаратов сформулированы при 30 грозовых часах, в то время как по данным [1] для многих РУ на территории России следует принять 50-80 грозовых часов в год. Поэтому предлагается в ПУЭ дать примечание о том, что требования к расстояниям сформулированы при 30 грозовых часах и менее. В случае, если число грозовых часов более 30 в год, необходимо пропорционально снижать допустимые расстояния [30].

Сопротивление заземления опор. ПУЭ обязывает обеспечить сопротивление заземления опор присоединенных ВЛ на подходах к РУ не более 10, 15, 20 Ом в зависимости от удельного сопротивления грунта. Согласно опыту эксплуатации многие опоры ВЛ на подходах к РУ имеют сопротивление заземления более 20 Ом, что приводит к росту числа обратных перекрытий и, как следствие, росту числа опасных грозовых перенапряжений на оборудовании [31]. Поэтому предлагается в ПУЭ добавить пункт, который рекомендует в случае повышенных (более 20 Ом) сопротивлений заземления опор ВЛ на подходах к РУ устанавливать дополнительные ОПН, размещаемые в линейные ячейки ВЛ или на сборные шины; при этом, прежде всего, влияние сопротивления заземления на защищенность оборудования РУ заметно для сетей 35-330 кВ.

Открытые распределительные устройства 110-220 кВ. В ПУЭ-7 в главе 4 есть примечание к табл.4.2.10:

«Расстояния от вентильных разрядников до электрооборудования, кроме силовых трансформаторов, не ограничиваются при количестве параллельно работающих ВЛ: на напряжении 110 кВ - 7 и более; 150 кВ - 6 и более; 220 кВ - 4 и более».

Типовые РУ 110-220 кВ, как правило, выполняются по схеме «две системы шин с обходной» (междущинный выключатель нормально замкнут). Нередко длина сборных шин крупных РУ 110-220 кВ с большим числом присоединений превосходит 200 м. Учитывая реальные габариты таких РУ, воздушные линии, присоединенные к одной системе шин, физически (скорость волны конечна) не успевают повлиять на грозовые перенапряжения на оборудовании другой системы

шин и оборудовании линейных ячеек присоединенных к ней ВЛ (см.[29]). Кроме того, следует помнить, что увеличение числа присоединенных ВЛ пропорционально увеличивает количество грозových волн, набегающих на РУ.

Расчетами грозových перенапряжений в РУ 110-220 кВ, которые здесь не приводятся, показано, что даже при большом числе присоединенных линий максимально допустимые расстояния до удаленного оборудования должны быть ограничены.

4.2. Предложения по корректировке ПУЭ

На основе проведенных расчетов и рассуждений сделаны следующие выводы и предложения, корректирующие требования ПУЭ в части защиты от грозových перенапряжений оборудования РУ:

- как высокоэффективный способ защиты оборудования от грозových (и коммутационных) перенапряжений в ПУЭ должны быть рекомендованы к использованию каскадные схемы, в которых защитные аппараты установлены на каждой присоединенной ВЛ 35-750 кВ вблизи от входа РУ («в линейной ячейке»);
- приведенные в таблицах ПУЭ максимально допустимые расстояния от оборудования до защитных аппаратов указаны при грозовой активности не более 30 грозových часов в год; в случае, если число грозových часов в районе расположения более 30 в год, допустимые расстояния должны быть пропорционально снижены;
- при замене разрядников на ОПН разрешается пересчитывать приведенные в таблицах ПУЭ максимально допустимые расстояния от защитных аппаратов до силовых трансформаторов, автотрансформаторов; нельзя пересчитывать максимально допустимые расстояния от защитных аппаратов до наиболее удаленного оборудования РУ (оборудования линейных ячеек), расположенного до защитных аппаратов (РВ или ОПН) по ходу набегающих с присоединенных ВЛ грозových волн;
- необходимо исключить примечание к табл.4.2.10 ПУЭ, допускающее не ограничивать расстояния до удаленного оборудования при большом числе присоединенных ВЛ 110, 150, 220 кВ; при большом числе ВЛ в качестве максимально допустимых расстояний от защитных аппаратов до удаленного оборудования можно принять те расстояния по ПУЭ, которые указаны при трех и более постоянных включенных ВЛ 110, 150, 220 кВ;
- допускается снижать длину тросового подхода ВЛ по сравнению со значениями, указанными в ПУЭ, в случае установки дополнительных ОПН в ее линейную ячейку;
- в случае повышенных (более величины 20 Ом, принятой в ПУЭ за максимально допустимую) сопротивлений заземления опор ВЛ 35-330 кВ на подходах к РУ в дополнение к ОПН, установленным в РУ у силовых трансформаторов и автотрансформаторов, необходимо устанавливать ОПН 35-330 кВ, размещаемые в линейные ячейки ВЛ или на сборные шины РУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в определенной мере назрел вопрос об изменении подходов к выбору схем защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений. Принимая во внимания все возрастающие требования к надежности электроснабжения, новые схемы защиты оборудования от грозовых перенапряжений, построенные с использованием современных защитных аппаратов типа ОПН, должны обеспечивать повышенную защищенность всего оборудования РУ от грозовых перенапряжений.

Учитывая это, актуальными представляются изложенные в параграфе 4.2 предложения по корректировке ПУЭ-7 в части выбора схем защиты изоляции оборудования 35-750 кВ от грозовых перенапряжений, которые базируются на следующих основных выводах, полученных в результате проведенных исследований:

- наибольшую опасность для оборудования РУ представляют грозовые перенапряжения, вызванные ударами молнии в фазные провода присоединенных ВЛ на расстоянии не более 500-1500 м от РУ (длина так называемого «опасного» подхода);
- удары молнии в фазные провода ВЛ на расстоянии более 500-1500 м практически не способны вызвать опасных грозовых перенапряжений на оборудовании РУ;
- для снижения числа прямых ударов молнии в фазные провода, а значит и числа опасных грозовых перенапряжений на оборудовании РУ, на длине «опасного» подхода ВЛ к РУ необходима установка тросовой защиты;
- увеличение длины тросового подхода ВЛ к РУ свыше длины «опасного» подхода не изменяет (не повышает) защищенности оборудования РУ от грозовых перенапряжений;
- наименьшая длина «опасного» подхода ВЛ 35-750 кВ к РУ необходима на тех присоединенных ВЛ, в линейных ячейках которых (т.е. на ВЛ у входа РУ) установлены защитные аппараты (разрядники или ОПН);
- в некоторых случаях на подходах ВЛ 35-110 кВ допустимо не устанавливать трос, так как ОПН линейной ячейки берет на себя выполнение роли троса по снижению числа опасных волн, проходящих на распределительное устройство;
- число набегających на РУ грозовых волн, вызванных ударами молнии в опоры и тросы присоединенных ВЛ, существенно зависит от сопротивления заземления опор на подходах ВЛ к РУ; следовательно, защищенность оборудования РУ от грозовых перенапряжений так же существенно зависит от сопротивления заземления опор на подходах ВЛ к РУ;
- так как число ударов молнии в опоры и тросы по крайней мере на порядок больше числа прорывов молнии на фазные провода, то важнейшей задачей защиты оборудования РУ от грозовых перенапряжений является обеспечение как можно более низких сопротивлений заземления опор ВЛ на подходах к РУ;
- наиболее важно обеспечение минимальных сопротивлений заземления 2-3 ближайших к РУ опор присоединенных ВЛ;

- в случае невозможности обеспечения малых сопротивлений заземления ближайших к РУ опор присоединенной ВЛ высокой защищенности оборудования РУ от грозовых перенапряжений можно достичь установкой защитного аппарата (разрядника или ОПН) в линейной ячейке этой ВЛ;
- наименее защищенным оборудованием РУ является оборудование линейных ячеек присоединенных ВЛ (при отсутствии в них защитных аппаратов);
- наличие в линейной ячейке присоединенной ВЛ защитного аппарата (разрядника или ОПН) повышает защищенность от грозовых перенапряжений установленного в ней оборудования;
- наличие в линейной ячейке присоединенной ВЛ защитного аппарата существенно повышает защищенность установленных в РУ силовых трансформаторов и автотрансформаторов от грозовых перенапряжений, вызванных ударами молнии в эту ВЛ;
- наиболее защищенным от грозовых перенапряжений будет оборудование того РУ, в котором в линейных ячейках присоединенных ВЛ установлены защитные аппараты; в таких РУ практически исключены повреждения изоляции силовых трансформаторов и автотрансформаторов от грозовых перенапряжений, вызванных набегаящими с присоединенных ВЛ грозовыми волнами;
- при снижении остающегося напряжения защитных аппаратов, установленных в РУ, максимальные грозовые перенапряжения на оборудовании снижаются;
- степень снижения грозовых перенапряжений на оборудовании (при заданном снижении остающегося напряжения защитных аппаратов) зависит от удаленности этого оборудования от защищенных аппаратов;
- наибольшее снижение перенапряжений достигается для силовых трансформаторов и автотрансформаторов, так как они наиболее близко расположены к защитным аппаратам;
- минимальное снижение перенапряжений характерно для наиболее удаленного от защитных аппаратов оборудования РУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. –2-е изд. –СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. –355 с.
2. Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И. Анализ надежности грозозащиты подстанций. –Л.: «Наука», 1981. –128 с.
3. Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. –М.: Энергоатомиздат, 2004.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Издание 15-е. – М.: Энергоатомиздат, 1996. –288 с.
5. EMTP Rule book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. Portland, Oregon 97208-3621, USA (www.emtp.org).
6. Dmitriev M.V., Evdokunin G.A., Gamilko V.A. EMTP Simulation of the secondary arc extinction at overhead transmission lines under single phase automatic reclosing//2005 IEEE St.Petersburg PowerTech Proceedings, June 27-30, 2005, Report №15.–ISBN 5-93208-034-0.
7. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Моделирование процессов в цикле ОАПВ с использованием программного комплекса EMTP//Сборник докладов международной научно-технической конференции “Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования”, 05-09 апреля 2004 года, выпуск №3, Минск.: Изд-во ПЭИПК Минтопэнерго РФ, С-Петербург, 2004. –380 с.
8. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Максимальные кратности грозových перенапряжений на подстанции//Известия РАН: Энергетика. –2004. –№2. –с.108-116.
9. Вольпов К.Д., Созинов А.В., Халилов Ф.Х. Результаты измерений входной емкости трансформаторов и реакторов 35-750 кВ//Электрические станции. –1982. –№9. –с.60-61.
10. Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Влияние способа моделирования ОПН и волны тока молнии на энергетические характеристики защитных аппаратов, установленных на опорах ВЛ//Электромеханика и Электроэнергетика: Научный вестник НГТУ. –2002. –№1(12), –с.91-100.
11. Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. Учебник для вузов. –СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 1995. –320 с. –ISBN 5-283-04423-8.
12. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции: Межгос. стандарт. –Введ. 01.01.99. –М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. –50 с.
13. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения/под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. –М.: Энергоатомиздат, 1989. –767 с.
14. Anderson J.G. Lightning Performance of Transmission Lines//Transmission Line Reference Book 345 kV and Above: Chapter 12. –EPRI, 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, California, 1992. – с.545-597.
15. Костенко М.В., Мессерман Д.Г. Деформация волн грозových перенапряжений в линиях передачи сверх и ультравысокого напряжения при большой длине пробега//Известия академии наук СССР: Энергетика и транспорт. –1987. –№3. –с.158-164.
16. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. –Л.: «Наука», Ленинградское отд-ние, 1988. –302 с. –ISBN 5-02-024434-1.
17. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. –320 с. –ISBN 5-9221-0082-3.
18. Кадомская К.П., Борисов Е.А. О моделировании волн тока молнии при исследовании грозозащиты электроэнергетических объектов//Сборник научных трудов НГТУ. –2003. – №2(32). –с.89-98.
19. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Параметры разряда молнии в задачах грозозащиты//Известия РАН: Энергетика». –2005. –№4. –с.54-61.

20. IEEE Std 1243-1997. IEEE Guide For Improving the Lightning Performance of Transmission Lines//The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. –New York, 1997. –36 p. –ISBN 1-55937-937-5.
21. Ларионов В.П., Колечицкий Е.С., Шульгин В.Н. Расчет вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту//Электричество. –1981. –№5. –с.19-23.
22. Базелян Э.М. Влияние рабочего напряжения на вероятность прорыва молнии к проводам воздушных линий//Электричество. –1981. –№5. –с.24-27.
23. ГОСТ 16357-83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальное напряжение от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия: Межгос. стандарт. –Введ. 01.07.84. –М.: Издательство стандартов, 1983. –26 с.
24. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ. – М.: Изд-во НТК “Электропроект”, 2000. –68 с.
25. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Защита оборудования подстанций 110-750 кВ от перенапряжений//Новости Электротехники. –2004. –№6(30). –с.42-45.
26. Аронов М.А., Аношин О.А., Кондратов О.И., Лопухова Т.В. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Методическое и справочное пособие. Под ред. М.А. Аронова. –М.: Изд-во “Знак”, 2001. –240 с. –ISBN 5-87789-013-1.
27. Лысков Ю.И., Антонова Н.П., Максимов В.М., Демина О.Ю. Проблемы применения нелинейных ограничителей перенапряжений 110-750 кВ//Электрические станции. –1988. –№9. –с.43-47.
28. Иманов Г.М., Таджикибаев А.И., Халилов Ф.Х. Анализ опыта эксплуатации ограничителей перенапряжений 110 кВ и выше в сетях РАО “ЕЭС России”//Промышленная энергетика. – 1998. –№ 1. –с.11-14.
29. Дмитриев М.В. Оценка защищенности оборудования подстанций от грозовых перенапряжений и анализ требований ПУЭ в части расстановки защитных аппаратов//Сборник докладов научно-технической конференции «Нелинейные ограничители перенапряжений: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, контроль состояния», 5-10 декабря 2005. –СПб.: Изд-во ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 2005. –164 с.
30. Гумерова Н.И. Проектирование грозозащиты ОРУ станций и подстанций//Сборник докладов 8-й научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности «ЭМС-2004». –СПб., 2004. –с.69-74.
31. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В., Невретдинов Ю.М. Повышение эффективности грозозащиты подстанций 330 кВ в регионах с высокоомными грунтами//Сборник докладов 8-й научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности «ЭМС-2004». –СПб., 2004. –с.65-69.