

УДК 621.311:551.516.4

## Экспериментальные исследования эффективности каскадной молниезащиты подстанций

Ю.М. Невретдинов<sup>1,2</sup>, Е.А. Токарева<sup>1</sup>, Д.И. Власко<sup>1</sup>, А.П. Домонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,

<sup>2</sup> Аптитский филиал МГТУ, кафедра электроэнергетики

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований схем молниезащиты на выведенном из работы участке сети 110 кВ. Эксперименты выполнены при генерировании импульсов до 40 кВ с моделированием защитных аппаратов, "прямых" и "обратных" перекрытий изоляции воздушной линии (ВЛ). Полученные результаты показали высокую эффективность каскадной молниезащиты подстанций даже при использовании на подходе линии электропередачи (ЛЭП) вентильных разрядников III группы. Эксперименты в действующей сети позволяют получить информацию о развитии перенапряжений, которую целесообразно использовать при контроле достоверности математических моделей.

**Abstract.** Experimental research results of lightning protection schemes at inoperative circuit area 110 kV have been showed in this work. The experiments have been carried out during pulses generation up to 40 kV with protective devices modeling, overhead transmission line insulation "direct" flashovers and "back" flashovers. The results have shown high efficiency of cascade substations lightning protection even under application of III group valve dischargers at transmission line approach. Experiments in operative circuit allow taking information about overvoltages development, which rationally can be used under mathematical models' validity control.

### 1. Введение

Каскадный принцип молниезащиты подстанций разработан еще в 80-х годах (Костенко и др., 1984) и предназначен, в основном, для не типовых схем и случаев нарушений нормативных требований с существенным снижением эффективности традиционной молниезащиты. В связи с дискуссией по вопросу включения этих схем в нормативные документы ниже рассматриваются результаты экспериментальных исследований их эффективности на выведенном из работы участке сети 110 кВ, расположенном на Кольском полуострове в районе с удельным сопротивлением грунта около 8000 Ом·м.

Формирование грозовых перенапряжений на оборудовании подстанций зависит от условий образования и деформации волн на линии, от развития волновых процессов в распределительном устройстве (РУ) с подключенными линиями, а также от влияния элементов сети с нелинейными характеристиками. Поэтому исследование эффективности защиты от грозовых волн, набегающих на РУ с воздушных линий, выполняется с помощью специализированных математических или аналоговых моделей и натурных экспериментов.

Основным преимуществом экспериментов в действующей сети является использование реальных элементов сети и среды развития электромагнитных процессов. Это позволяет учесть конструктивное исполнение элементов сети, в том числе трехфазность и протяженность, а также электрические характеристики грунта, заземлителей и т.п. Вторым важным преимуществом таких исследований является отсутствие масштабирования по времени, а также учет влияния реальных частотных зависимостей характеристик грунта и элементов действующей сети. К недостаткам экспериментов в выделенном участке сети можно отнести значительную сложность их организации и проведения, а также ограничения возможности изменения схем и конструктивного исполнения элементов сети.

### 2. Методика. Экспериментальные исследования в действующих сетях

Эксперименты в натуральных условиях с моделированием грозовых воздействий, соответствующих реальным разрядам молнии, требуют генерирования в элементах сети импульсных токов в десятки килоампер, что практически нереализуемо. Кроме того, возникающие при таком генерировании перенапряжения опасны для изоляции электрооборудования. Поэтому эксперименты с использованием высоковольтных генераторов импульсных напряжений (ГИН) выполняются в ограниченном объеме, в том числе на отрезках воздушных ЛЭП для исследований импульсной короны или на элементах заземляющих устройств. На участках действующей сети с подстанционным оборудованием исследования выполняются при пониженном напряжении с соответствующим масштабом по току и напряжению. Ввиду чрезвычайной сложности организации таких испытаний в действующих сетях,

выполнения измерений импульсных процессов в полевых условиях и методической постановки экспериментов, такие исследования остаются уникальными в мировой практике.

Для экспериментальных исследований импульсных процессов в элементах высоковольтной сети при пониженном импульсном напряжении на кафедре ИЭ и ТВН Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) были разработаны комплекс аппаратуры – анализатор переходных процессов (АПП) и соответствующие методики обследования силовых трансформаторов и участков сети (Гольдштейн и др., 1977). Этот комплекс позволил расширить область исследования в сетях различных классов напряжения.

Основным недостатком опубликованных натурных испытаний с АПП (Костенко и др., 1981; Костенко и др., 1984) является отсутствие влияния на переходные процессы импульсных перекрытий изоляции, рабочего напряжения и импульсной короны. Полностью отсутствуют публикации о воспроизведении в сети процессов "обратных" перекрытий с опоры ЛЭП на провода и междуфазных искровых перекрытий изоляции.

Для повышения эффективности экспериментальных исследований систем молниезащиты в действующих сетях изучена возможность достоверного моделирования искровых перекрытий изоляции и процессов стекания тока через изолирующие устройства путем увеличения генерируемого напряжения. При этом обеспечивается условие безопасности для изоляции подстанционного оборудования. Так, для моделирования "обратного" перекрытия изоляции необходимо обеспечить достаточно высокое падение напряжения на опоре и ее заземлении, в том числе и для опор с тросами и противовесами. При указанном подходе ограничение величины генерируемого напряжения связано с обеспечением безопасности для изоляции оборудования сети и возможностью реализации моделей защитных аппаратов (ЗА) и импульсного перекрытия изоляции линии с нелинейными вольт-секундными характеристиками (ВСХ) и вольтамперными (ВАХ) характеристиками.

В приведенных ниже экспериментальных исследованиях масштаб по току и напряжению выбран 1/300 с учетом следующих ограничений:

- допустимый ток для элементов моделей ЗА с использованием нелинейных резисторов типа СН2-2А и диносторов не должен превышать 50 А;
- пропускная способность моделей импульсных перекрытий изоляции (МИПИ) с нелинейной ВСХ, реализованных на базе разрядников Р-35, не превышает 2500 А.

Реализованные ВСХ моделей импульсного перекрытия изоляции и ЗА приведены на рис. 1.

В результате многочисленных исследований разработаны две идентичные модели для случаев возникновения "прямого" и "обратного" перекрытия изоляции линии. Экспериментально полученные разрядные напряжения моделей МИПИ даны на рис. 1 в виде точек. Здесь же дано сопоставление с ВСХ линии 110 кВ с учетом масштаба моделирования.

Реализованные модели вентильных разрядников (МРВ) имеют ВАХ разрядников 110 кВ II и III группы по ГОСТ 16357-79 с учетом выбранного масштаба моделирования по току и напряжению. ВАХ моделей защитных аппаратов (точки) и сопоставление с характеристиками по ГОСТ (сплошные линии) приведены на рис. 2.

Параметры моделей МИПИ и МРВ проверялись в полевых условиях на компактной высоковольтной установке перед подключением их к линии. Контрольные испытания моделей, выполненные в лаборатории после экспериментов в сети, показали отсутствие отклонений от первоначальных характеристик (рис. 1 и 2).

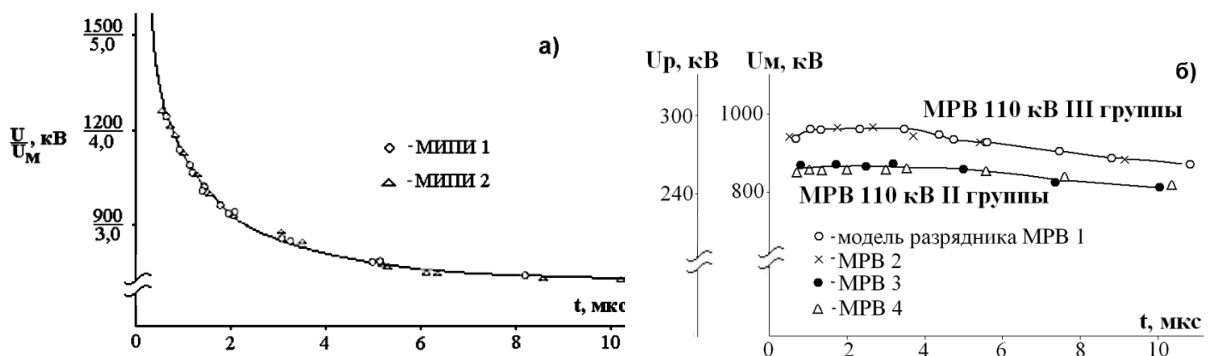


Рис. 1. Вольт-секундные разрядные характеристики изоляции ВЛ 110 кВ на железобетонных опорах  $U$  и моделей импульсного перекрытия изоляции ВЛ (МИПИ)  $U_m$  с учетом масштаба моделирования по напряжению 1/300 (а) и характеристики напряжения срабатывания вентильных разрядников и их моделей (б)

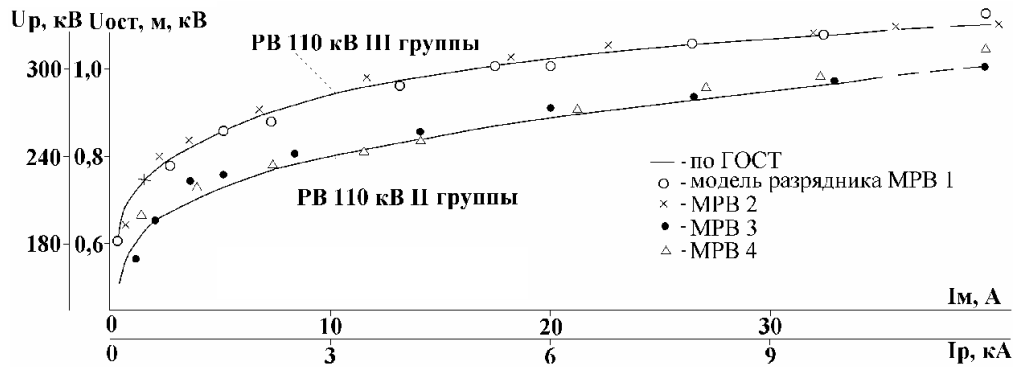


Рис. 2. Вольтамперные характеристики вентильных разрядников и их моделей

В соответствии с разработками МИПИ и МРВ приняты ограничения генерируемого напряжения величиной 40 кВ, а импульсного тока в пределах 100 А.

### 3. Характеристика участка сети 110 кВ

Экспериментальные исследования по моделированию перенапряжений выполнены на участке действующей сети, включающем тупиковую подстанцию 110 кВ с подключенной воздушной линией.

Конструкция подхода наиболее характерна для региона с высоким сопротивлением грунта. Общая протяженность участка линии от ГИН до подстанции составляет 1 км. Число опор – 11. Расположение опор и длины пролетов приведены на рис. 3. Средняя величина волнового сопротивления провода составила около 480 Ом. Грозозащитный трос ТК-17 закреплен на опорах с 1 по 7, высота подвеса троса на опорах с 3 по 7 – 20,5 метра.

Все опоры с тросом снабжены заземляющими спусками, соединяющими тросы с заземлением и металлическими траверсами на железобетонных опорах.

Все опоры оборудованы сосредоточенными заземлителями; опоры с 1 по 7 соединены между собой и контуром подстанции протяженным заземлителем, выполненным из катанки диаметром 12 мм. Измеренное сопротивление заземления подстанции составило 5 Ом, сопротивление заземления ГИН – 70 Ом, опоры 10 – около 400 Ом.

Исследуемый участок линии ВЛ-1 соединен с участком линии ВЛ-2 110 кВ длиной около 2 км, на противоположном конце которого выполнено согласование фазных проводов через резисторы 480 Ом. ГИН подключен к одной из фаз линии ВЛ-1 в точке соединения ВЛ-1 с ВЛ-2.

С учетом времени распространения волн по указанным участкам линии волна перенапряжений на подстанции возникает примерно через 3 мкс после срабатывания ГИН. Отражение от противоположного конца ВЛ-2 приходит на подстанцию с запаздыванием еще на 14 мкс. Поэтому на этом интервале времени отражения от конца участка ВЛ-2 не влияют на форму перенапряжений на подстанции.

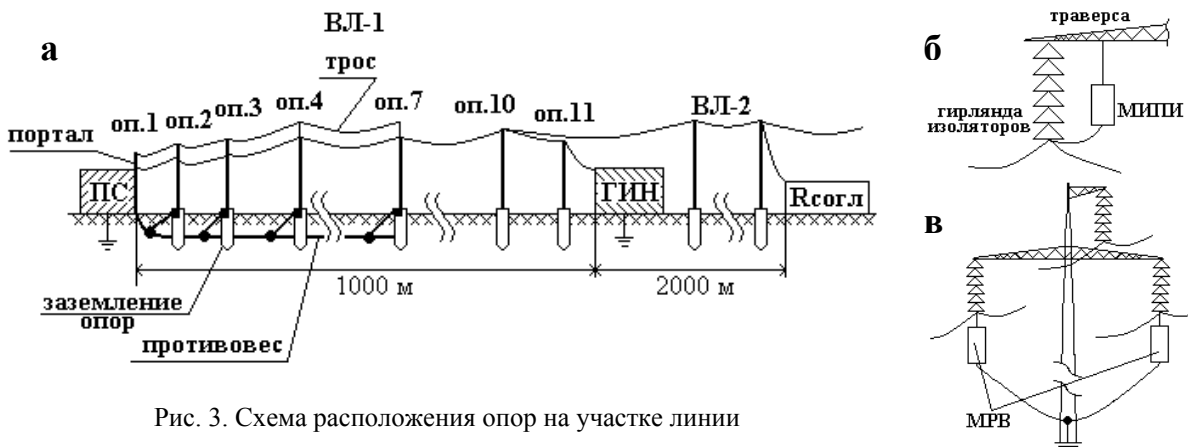


Рис. 3. Схема расположения опор на участке линии

### 4. Моделирование деформации грозовых волн на линии

Эксперименты включали 2 этапа:

- 1 – исследования деформации волн от потерь в земле и перекрытий изоляции;
- 2 – изучение эффективности каскадной защиты подстанции.

Исследования деформации волн и перенапряжений на трансформаторе тупиковой подстанции выполнены при генерировании на фазном проводе "А" импульса напряжения с варьированием амплитуды от 3 до 40 кВ. Фронт волны изменялся от 0,1 мкс до 7,5 мкс. Длина импульса составила около 150 мкс.

Импульсные перекрытия линейной изоляции моделировались при помощи моделей МИПИ, установленных на опоре 4 с тросом и противовесом или на опоре 10 (рис. 3а). Каждая модель располагалась параллельно соответствующей гирлянде изоляторов таким образом, чтобы при срабатывании МИПИ импульсный ток протекал вдоль гирлянды по траверсе и через опору (рис. 3б). При значительном увеличении импульсного напряжения на гирлянде изоляторов соседнего фазного провода до напряжения срабатывания второй модели МИПИ и его коммутации контуры протекания импульсного тока полностью соответствуют реальному физическому процессу при повторном или "обратном" перекрытии изоляции ВЛ.

Примеры деформации волн на подходе (рис. 3а) приведены на рис. 4 для случаев:

- 1) "прямого" (на фазе "А") и "обратного" (на фазе "В") перекрытий изоляции ВЛ на опоре 10 с сопротивлением заземления ( $R_3$ ) около 400 Ом (рис. 4а);
- 2) для случаев аналогичных перекрытий на опоре 4 с тросом и противовесом (рис. 4б).

Как видно из рис. 4а, при высоком сопротивлении заземления опоры "прямое" (с провода на опору) и "обратное" (с опоры на провод) перекрытия происходят практически одновременно. Образованная вследствие "обратного" перекрытия (на фазе "В") волна имеет практически прямоугольный фронт с изменением полярности волны. После прямого перекрытия изоляции на опоре 10 значительного среза волны (на фазе "А") не происходит, так как остающееся напряжение определяется большим падением напряжения на сопротивлении заземления опоры. Применение троса и противовеса при высоких сопротивлениях заземления опор позволяет существенно снизить энергию приходящей на подстанцию волны и значительно увеличивает интервал времени между "прямым" и "обратным" перекрытиями. При этом существенно изменяется форма волны, образованной после "обратного" перекрытия (на фазе "В").

Рис. 4. Примеры искажений волны вследствие перекрытий изоляции ВЛ на опоре 10 (а) и 4 с тросом и противовесом (б).  $U_A, U_B$  – напряжения на фазных проводах "А" и "В"

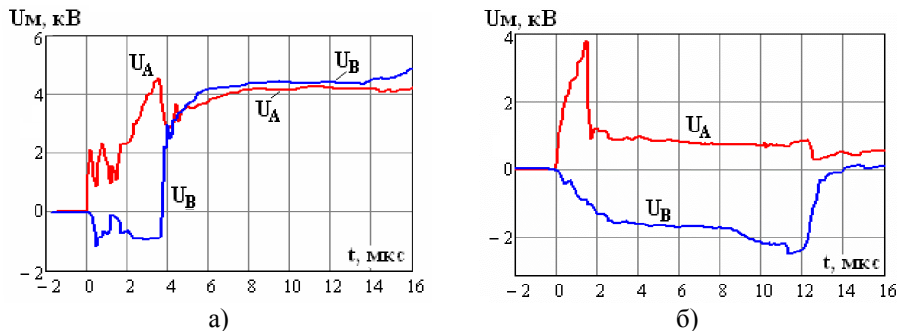
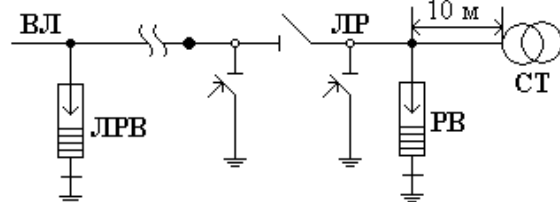


Рис. 5. Схема подстанции 110 кВ. Преобразование традиционной защиты в каскадную с помощью подключения на подходе ВЛ линейного комплекта защитных аппаратов (ЛРВ)



### 5. Исследование традиционной молниезащиты подстанции

Подстанция, подключенная к ВЛ-1, является тупиковой с одним силовым трансформатором. Молниезащита подстанции выполнена по традиционной схеме при помощи одного комплекта разрядников РВ 110 кВ II группы, подключенных на расстоянии 10 м (по ошиновке) от силового трансформатора (рис. 5). Каскадная схема предполагает установку дополнительного комплекта РВ 110 кВ III группы (ЛРВ) на подходе линии, т.е. перед подстанционным комплектом РВ по направлению распространения грозовых волн.

В экспериментах разрядник РВ 110 кВ продублирован моделью МРВ II, а при моделировании каскадной молниезащиты подстанции модели ЛРВ (МРВ III) устанавливались у опоры 3, т.е. на расстоянии около 125 м от подстанционного разрядника (см. рис. 3). Каждая модель МРВ III подключалась к соответствующему проводу ВЛ при помощи индивидуального спуска длиной около 10 м. Заземление моделей МРВ III выполнено через заземлитель опоры при помощи индивидуальных для каждой модели спусков длиной около 5 м (рис. 3в). Таким образом, в переходном процессе учитывались реальные индуктивности ошинок ответвлений и заземлений.

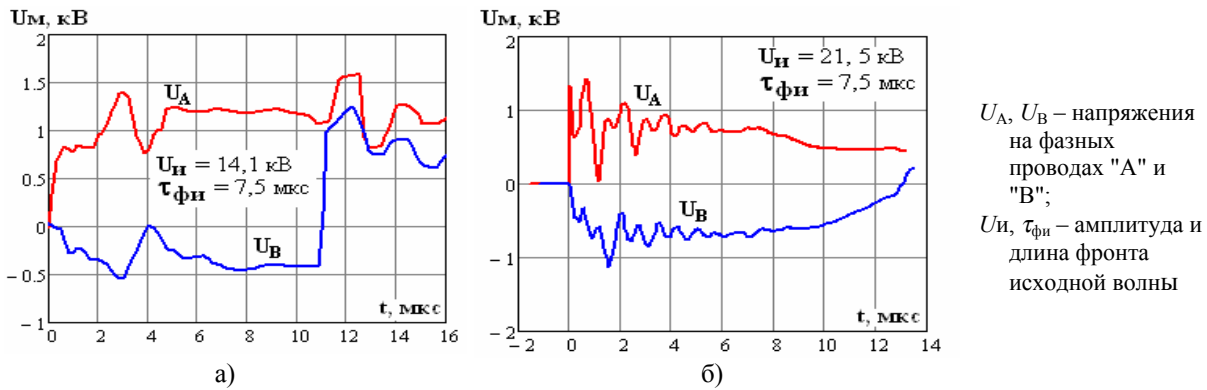


Рис. 6. Осциллограммы перенапряжений на изоляции силового трансформатора с защитой по ПУЭ при перекрытии изоляции на опоре 10 (а) и на опоре 4 с тросами и противовесам (б)

Параметры грозовых перенапряжений, в частности, зависят от процессов перекрытия изоляции. Характерные осциллограммы перенапряжений на изоляции силового трансформатора для традиционной защиты при ударах молнии в провода ВЛ представлены на рис. 6. Здесь же указаны параметры генерируемых волн – амплитуда и длина фронта. Приведенные процессы учитывают импульсные перекрытия изоляции ВЛ на подходе на опорах 10 с  $R_3 \approx 400$  Ом (рис. 6а) или 4 с тросом и противовесом (рис. 6б).

Как видно на рис. 6а, перекрытие изоляции произошло примерно через 4 мкс, а "обратное" перекрытие на фазу "В" произошло с задержкой примерно на 8 мкс. При этом наибольшая величина перенапряжений возникла на фазе "А", пораженной разрядом молнии, и на фазе "В" после "обратного" перекрытия. Из сопоставления осциллограмм рис. 6а и 6б видно, что применение противовеса и троса существенно снижает амплитуду перенапряжений и вероятность "обратного" перекрытия. Так, увеличение амплитуды импульса на 18 % с 14,1 кВ (рис. 6а) до 21,5 кВ (рис. 6б) приводит к увеличению амплитуды перенапряжений менее чем на 1 %.

Соответствующие уровни максимальных перенапряжений в зависимости от амплитуды тока молнии для различной длины фронта тока молнии (с учетом масштаба моделирования по току и напряжению 1/300) приведены на рис. 7.

Для сопоставления представленных на рис. 7 зависимостей получены значения относительных изменений уровня перенапряжений при моделировании перекрытий изоляции на опоре 4 с тросом и противовесами по отношению к варианту с перекрытиями изоляции на опоре 10, имеющей  $R_3 \approx 400$  Ом. Расчеты выполнены для опытов с близкими значениями генерируемых токов по формуле, учитывающей поправку на отклонения токов,

$$\Delta U_{пн} = [(U_{пн10} - U_{пн4}) / U_{пн10}] \cdot (I_4 / I_{10}),$$

где  $\Delta U_{пн10}$  или  $\Delta U_{пн4}$  – амплитуда перенапряжений на трансформаторе при ударе молнии в провод и перекрытиях на опоре 10 или на опоре 4 с соответствующей амплитудой тока молнии  $I_{10}$  или  $I_4$ .

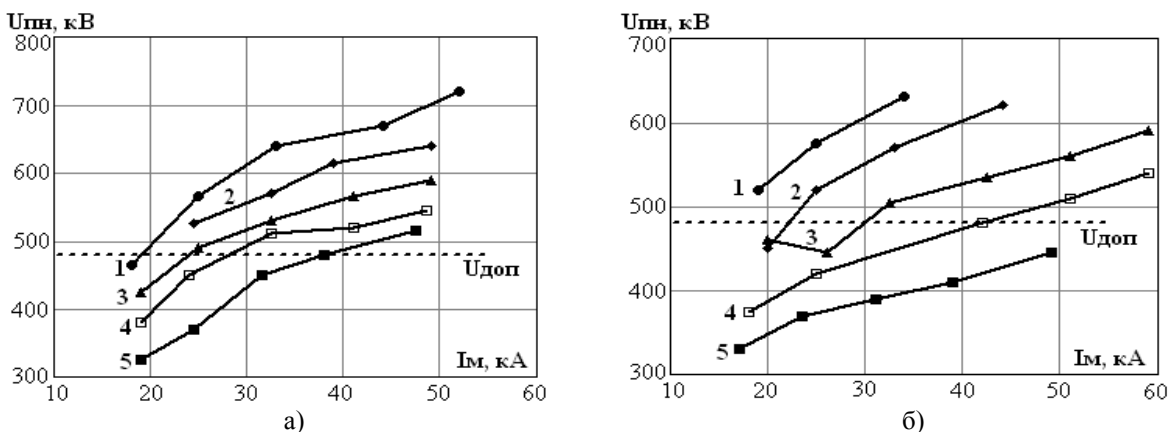


Рис. 7. Уровни перенапряжений на изоляции силового трансформатора 110 кВ с традиционной защитой по ПУЭ в зависимости от амплитуды ( $I_m$ ) и длины фронта  $\tau_{фн}$  тока молнии для экспериментов с моделированием перекрытий изоляции на опоре 10 (а) или на опоре 4 с тросом и противовесом (б) (1 –  $\tau_{фн} = 0,1$  мкс; 2 – 0,9 мкс; 3 – 2,3 мкс; 4 – 4 мкс; 5 – 7,5 мкс;  $U_{доп}$  – допустимый уровень перенапряжений). Токи и напряжения приведены с учетом коэффициента моделирования

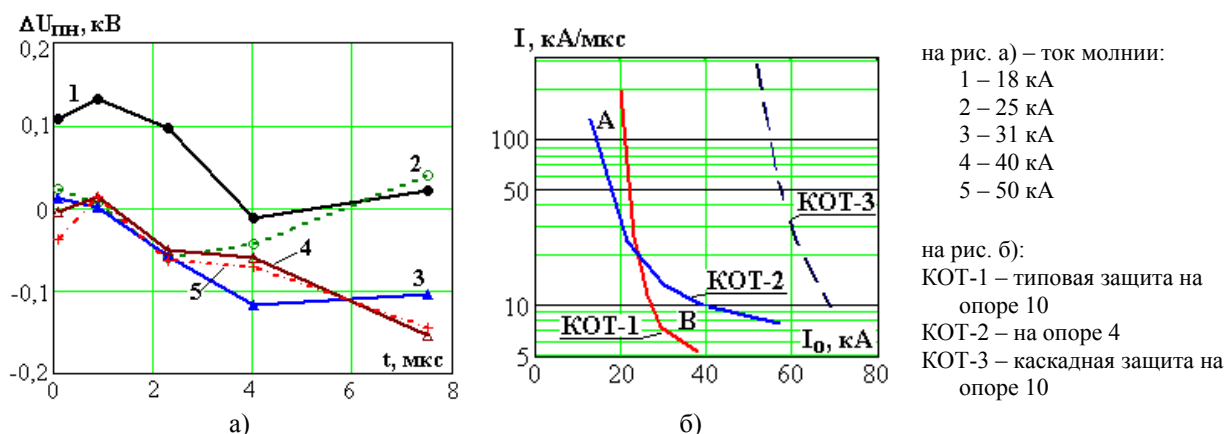


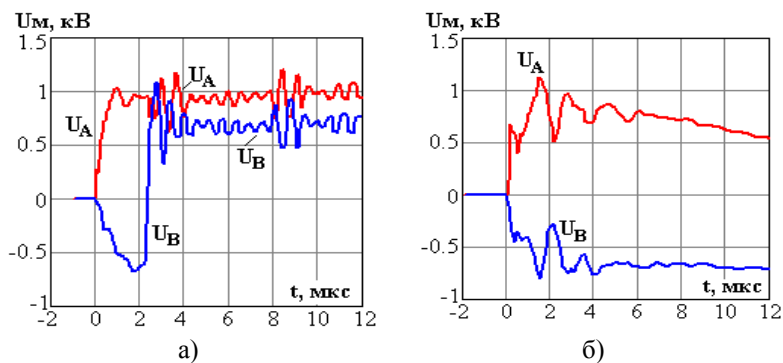
Рис. 8. Относительное изменение уровня перенапряжений на силовом трансформаторе подстанции с типовой молниезащитой при использовании на опорах троса и противовеса в зависимости от длины фронта волны для разных токов молнии (а) и соответствующие кривые опасных параметров токов молнии при ударе в провод (б)

Полученные относительные изменения уровня перенапряжений приведены на рис. 8а в виде зависимостей от длины фронта набегающих по линии грозовых волн. На рис. 8б дано сопоставление кривых опасных параметров тока молнии (КОТ), связывающие амплитуду и крутизну тока молнии, при которых на изоляции силового трансформатора уровень перенапряжений достигает допустимого значения  $U_{доп}$ .

Как видно на рис. 8а, эффективность снижения импульсного сопротивления опор за счет противовесов и тросов позволяет снизить уровень перенапряжений до 10-15 %. Однако этот эффект проявляется не во всех случаях. Так, при длине фронта импульса менее 1 мкс снижение перенапряжений  $\Delta U_{пн}$  незначительно. Тот же эффект проявляется при уменьшении амплитуды тока молнии до 20 кА и ниже. Более того, при ударах молнии с относительно низкой амплитудой (до 20 кА) и длиной фронта менее 3 мкс наблюдается увеличение перенапряжений (см. зависимость 1 на рис. 8а). Это можно объяснить влиянием отражений на участке между подстанцией и точкой перекрытия. Из данных рис. 8б также следует, что в области параметров молнии имеется точка, разделяющая зависимости КОТ для рассмотренных случаев перекрытий изоляции. Так, при токах молнии, превышающих 23 кА, граница области опасных ударов молнии для случаев перекрытий на опоре 10 с  $R_3 \approx 400$  Ом находится существенно ниже границы, соответствующей перекрытиям на опоре 4, таким образом, вероятность опасных перенапряжений по КОТ-1 увеличивается. Однако при уменьшении амплитуды тока менее 23 кА большую опасность представляют случаи с перекрытиями на опоре 4. В приведенном примере вероятность ударов молнии с параметрами, соответствующими области А, меньше, чем ударов молнии с параметрами в области В. Поэтому в целом снижение импульсного сопротивления заземления опор дает повышение эффективности молниезащиты. Оценка вероятности разрядов молнии с параметрами, ограниченными кривой КОТ-1, составляет около  $P(I_m, \dot{I}_m)_{КОТ-1} \approx 0,227$ . Вероятность опасных параметров тока молнии по КОТ-2 составляет около  $P(I_m, \dot{I}_m)_{КОТ-2} \approx 0,191$ . Т.е. применение противовесов в данном случае повышает эффективность защиты немногим менее чем в 1,2 раза.

Приведенное сопоставление в некоторой степени условно, так как расстояние до точек перекрытия (опора 10 или опора 4) в опытах отличается, что подтверждает тезис об ограниченности варьирования экспериментальных исследований в условиях действующей сети.

Рис. 9. Осциллограммы грозовых перенапряжений на силовом трансформаторе с каскадной молниезащитой при экспериментальном моделировании в действующей сети 110 кВ. Моделирование перекрытий изоляции на опорах 10 с  $R_3 \approx 400$  Ом (а) или 4 с тросом и противовесом (б)



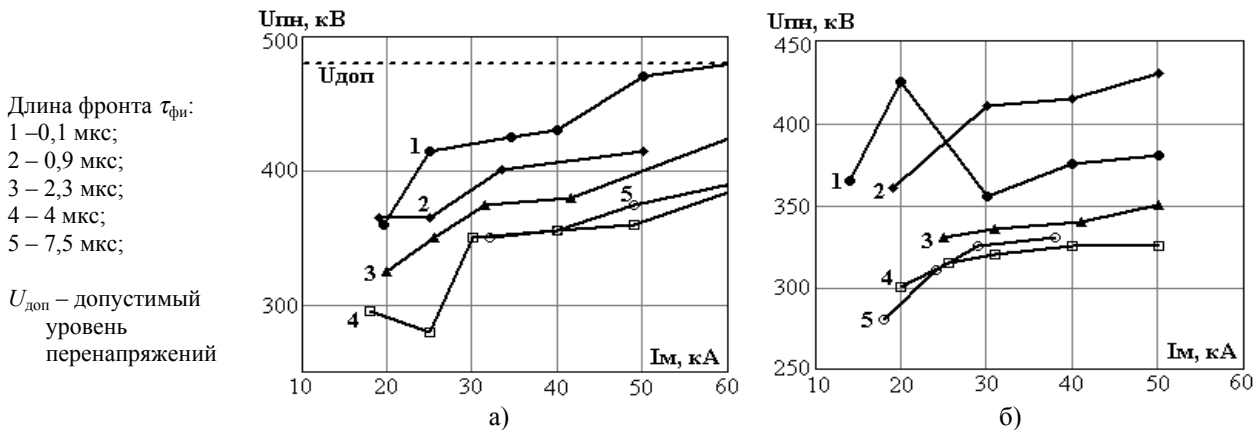


Рис. 10. Зависимость уровней перенапряжений на изоляции силового трансформатора 110 кВ с каскадной молниезащитой в зависимости от амплитуды ( $I_M$ ) и длины фронта  $\tau_{\text{фи}}$  тока молнии, полученные в экспериментах с моделированием перекрытий изоляции на опоре 10 с  $R_3 \approx 400$  Ом (а) или на опоре 4 с тросом и противовесом (б). Токи и напряжения приведены с учетом коэффициента моделирования

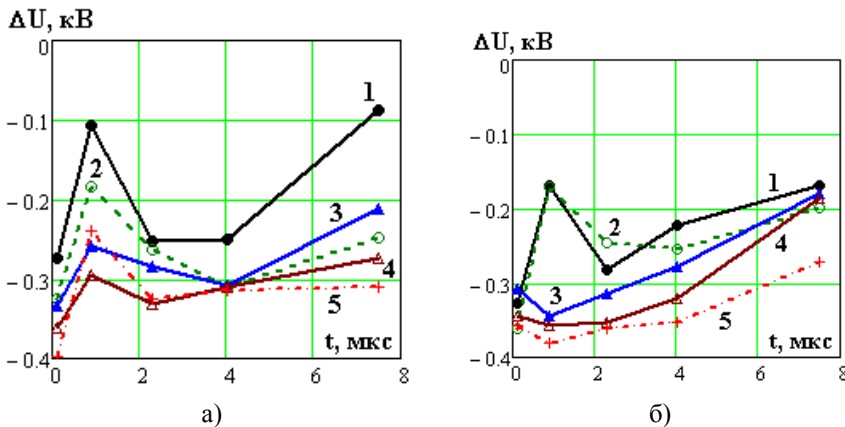


Рис. 11. Зависимость изменения уровней перенапряжений от длины фронта волны при применении каскадной молниезащиты подстанции. Эксперименты с учетом перекрытий на опоре 10 ( $R_3 \approx 400$  Ом) (а) или на опоре 4 с противовесом и тросом (б). Расчетный ток молнии: 18 кА (1), 25 кА (2), 31 кА (3), 40 кА (4) 50 кА (5)

### 6. Исследование каскадной молниезащиты подстанции

Экспериментальное генерирование перенапряжений в схеме подстанции с каскадной молниезащитой выполнено по аналогии с вышеуказанными опытами с традиционной защитой, т.е. с учетом перекрытий на опоре 10 или опоре 4. Примеры осциллограмм перенапряжений на силовом трансформаторе для импульсных волн с длиной фронта 7,5 мкс даны на рис. 9.

Результаты систематизации регистраций перенапряжений даны на рис. 10 в виде зависимостей от амплитуды тока молнии, аналогичных зависимостям, приведенным на рис. 7 для традиционной схемы.

Как видно из рис. 10а, в условиях выполненных экспериментов с моделированием перекрытий на опоре 10 с  $R_3 \approx 400$  Ом опасные перенапряжения возможны при токах 60 кА и более. Таким образом, уменьшение энергии волн за счет ответвления части тока через заземление опоры 10 существенно снижает их опасность для изоляции оборудования подстанций. В опытах с перекрытиями изоляции на опоре 4 с тросом и противовесом при указанных выше ограничениях к параметрам генерируемых волн не удалось получить перенапряжений более допустимого уровня 480 кВ (с учетом масштаба моделирования, см. рис. 10б).

Эксперименты в натуральных условиях с учетом импульсных перекрытий показали неоднозначное влияние импульсных параметров противовесов на формирование перенапряжений. Так, из сопоставления данных рис. 10а и б следует, что в рассмотренной схеме существуют области неблагоприятных сочетаний параметров токов молнии, при которых перенапряжения в случаях перекрытий на опорах с тросом и противовесом (рис. 10б) могут превысить перенапряжения при перекрытиях на опоре с  $R_3 \approx 400$  Ом. Например, участки кривых для фронта 0,1 мкс в диапазоне от 18 до 25 кА. Таким образом, процессы формирования перенапряжений при перекрытиях на опоре с сосредоточенным заземлителем и противовесом могут существенно отличаться.

В качестве показателей эффективности каскадной защиты на рис. 11 показаны зависимости относительной величины снижения перенапряжений (по сравнению с традиционной защитой) от длины

фронта и амплитуды тока молнии. Фронт импульса менялся от 0,1 мкс до 7,5 мкс для токов ГИН, эквивалентных амплитудам тока молнии от 18 кА до 50 кА. Сопоставление дано для аналогичных указанных выше опытов с традиционной молниезащитой с учетом перекрытий на опоре с высоким сопротивлением заземления (480 Ом) или на опоре с тросом и противовесом (рис. 7а и 7б соответственно).

Из данных рис. 11 видно, что применение на подходе в качестве линейных защитных аппаратов вентильных разрядников III группы снижает амплитуду перенапряжений от 10 % до 35 % и более. В основном наблюдается тенденция снижения перенапряжений при уменьшении длины фронта и увеличении амплитуды тока. Для рассмотренной подстанции исключением являются перенапряжения при генерировании импульса напряжения с фронтом около 1 мкс, что может быть обусловлено увеличением колебательной составляющей перенапряжений.

Сопоставление зависимостей на рис. 11а и 11б показывает, что в подавляющей области параметров токов молнии действие противовесов способствует снижению перенапряжений на оборудовании рассматриваемой подстанции. Для оценки целесообразности дополнительных мер по снижению импульсного сопротивления заземления опор в каскадной защите на рис. 8б приведена кривая опасных токов молнии для каскадной защиты с опорами на подходе, аналогичными опоре 10 с  $R_3 \approx 400$  Ом (КОТ-3). Оценка вероятности разрядов молнии с параметрами, ограниченными кривой КОТ-3, составляет около  $P(I_m, I_m)_{КОТ-3} \approx 0,046$ . Т.е. каскадная схема повышает эффективность защиты более чем в 4 раза в сравнении с традиционной защитой с использованием противовесов на подходе ЛЭП. Дальнейшее повышение надежности молниезащиты подстанции с помощью уменьшения импульсного сопротивления опор на подходе ЛЭП может быть экономически нецелесообразным.

## 7. Заключение

Для экспериментальных исследований схем молниезащиты на участке сети 110 кВ реализованы модели "прямых" и "обратных" перекрытий изоляции линии и защитных аппаратов с нелинейными характеристиками. Это позволило учесть влияние импульсных характеристик заземлителей опор, в том числе противовесов.

Полученные результаты показали высокую эффективность каскадной молниезащиты подстанций даже при использовании на подходе ЛЭП вентильных разрядников III группы. Применение каскадной схемы с противовесами на подходе до опоры с линейными защитными аппаратами обеспечивает эффективную защиту тупиковой подстанции 110 кВ даже при высоких сопротивлениях заземления опор на подходе. Таким образом, при использовании каскадной защиты имеется возможность существенного снижения требований к заземлениям опор на подходах ЛЭП.

При исследованиях молниезащиты подстанций в районах с низкой проводимостью грунта необходим учет влияния наведенных напряжений на вероятность "обратных" перекрытий изоляции ЛЭП и форму грозовых волн.

Эксперименты в действующей сети позволяют получить информацию о развитии перенапряжений, которую целесообразно использовать при контроле достоверности математических моделей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 06-08-00473.

## Литература

- Гольдштейн В.Г., Покровский А.В., Халилов Ф.Х. Сопоставление расчетных и экспериментальных исследований атмосферных перенапряжений на подстанциях 110 кВ. *Известия АН СССР, Энергетика и транспорт*, № 3, с.79-89, 1977.
- Костенко М.В., Ефимов Б.В., Гумерова Н.И. Анализ надежности грозозащиты подстанций. *Л., Наука*, 128 с., 1981.
- Костенко М.В., Халилов Ф.Х., Невретдинов Ю.М. Грозозащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта. *Л., Наука*, 112 с., 1984.