



Дмитриев М.В.

Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ

Санкт-Петербург
2009

ББК 31.241

Д 53

Дмитриев М.В. **Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6-750 кВ.**
–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. –92 с.

Рассмотрены актуальные вопросы применения ОПН для защиты от перенапряжений изоляции воздушных линий 6-750 кВ, при строительстве которых использованы голые провода (не защищенные слоем изоляции).

Предназначено для сотрудников проектирующих и эксплуатирующих организаций, а также для студентов старших курсов электроэнергетических специальностей.

Осознанию многих вопросов применения ОПН на ВЛ способствовало многолетнее общение автора с Дмитриевым В.Л. – признанным специалистом в области ОПН, человеком, чей опыт и активное участие помогли впервые в России с помощью ОПН защитить от грозных перенапряжений линию 400 кВ «Линке-1,2», по которой осуществляется экспорт электроэнергии в скандинавские страны.

ISBN 978-5-7422-2373-3

© М.В. Дмитриев, 2009

© ЗАО «Завод энергозащитных устройств», 2009

Оглавление

Введение	4
1. Перенапряжения на изоляции ВЛ	5
1.1. Разряд молнии в фазный провод ВЛ	11
1.2. Разряд молнии в опору ВЛ без троса	17
1.3. Разряд молнии в трос ВЛ	20
1.4. Разряд молнии рядом с ВЛ	22
1.5. Общие способы снижения грозовых перенапряжений на ВЛ	24
1.6. Особенности защиты многоцепных опор ВЛ	26
1.7. Импульсное сопротивление заземления	28
2. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ	30
2.1. Конструкция и принцип действия ОПН	30
2.2. ОПН и внешние (грозовые) перенапряжения на ВЛ	33
2.2.1. Места установки ОПН вдоль трассы ВЛ	33
2.2.2. Места установки ОПН на одноцепных опорах	34
2.2.3. Места установки ОПН на многоцепных опорах	37
2.2.4. ОПН как альтернатива традиционным средствам защиты ВЛ	38
2.3. ОПН и внутренние перенапряжения на ВЛ	41
2.3.1. Коммутационные перенапряжения	41
2.3.2. Квазистационарные перенапряжения	43
2.4. Основные типы ОПН и способ их присоединения к ВЛ	46
2.5. О выборе характеристик ОПН для защиты изоляции ВЛ	49
2.6. Связь импульсных токов и напряжений стандартной формы	50
3. Подробные расчеты грозовых процессов на примере ВЛ 110 кВ	52
3.1. Описание расчетной модели	52
3.1.1. Моделирование воздушной линии	54
3.1.2. Моделирование импульса тока молнии	56
3.1.3. Моделирование ОПН	57
3.1.4. Статистические расчеты в ЕМТР	57
3.2. Обоснование эффективности традиционных способов повышения грозоупорности на примере разряда молнии в опору или трос	60
3.3. Обоснование частоты установки ОПН вдоль трассы ВЛ на примере разряда молнии в фазный провод	65
3.4. Обоснование мест первоочередной установки ОПН на опоре ВЛ	68
3.5. Число отключений ВЛ до и после установки ОПН	70
3.6. Токовые и энергетические нагрузки на ОПН	73
3.6.1. Выбор числа моделируемых опор на примере ВЛ без троса	73
3.6.2. Расчет токовых и энергетических нагрузок на ОПН	78
3.7. Выбор характеристик ОПН и оценка риска его повреждения	82
Заключение	85
Список использованных источников	87
Приложение 1. Основные характеристики ОПН	89
Приложение 2. О заводе энергозащитных устройств	91

Введение

Источником грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ могут быть как прямые разряды молнии [1] в ВЛ (в опору, в молниезащитный трос, в фазный провод), так и наведенное напряжение от разрядов молнии в объекты вблизи ВЛ. Для обеспечения необходимого уровня грозоупорности ВЛ во всех этих случаях используют сочетания традиционных средств грозозащиты [2,3]: установку одного или нескольких молниезащитных тросов, снижение сопротивления заземления опор, усиление изоляции.

В ряде случаев, в силу объективных причин (высокие значения сопротивления заземления опор ВЛ из-за высокого удельного сопротивления грунта, невозможность применения молниезащитных тросов из-за высоких ветро-гололедных нагрузок и т.п.) традиционные средства грозозащиты не могут обеспечить необходимую грозоупорность ВЛ. Тогда эффективным способом повышения грозоупорности может стать установка на опорах ВЛ так называемых «подвесных» ОПН.

Эффективность повышения грозоупорности ВЛ при помощи установки подвесных ОПН подтверждена как многими теоретическими исследованиями расчетами, так и опытом эксплуатации [2-16]. Несмотря на это, согласно [11], где приводится анализ более чем 30-и публикаций, до сих пор нет единого мнения по многим вопросам, среди которых:

- выбор типа ОПН (с искровым промежутком или без);
- выбор мест размещения ограниченного числа комплектов ОПН на опоре (в верхние или нижние фазы; в крайние или средние), обеспечивающих наиболее эффективное снижение числа перекрытий изоляции ВЛ;
- основные требуемые характеристики ОПН и, прежде всего, энергоемкость.

Обзор отечественных и зарубежных публикаций, результаты которого в сжатой форме приведены в [11], показал, что недостаточно изученными являются многие вопросы, связанные с расчетом и применением подвесных ОПН. Следствием этого в ряде случаев является использование некорректных расчетных моделей и принятие на основе выполненных расчетов ошибочных технических решений. Малоизученными являются вопросы, понимание которых необходимо для правильного выбора характеристик ограничителей перенапряжений, такие, как форма импульсного тока в ОПН, максимальные токовые и энергетические нагрузки на ОПН.

В России нет нормативных документов, регламентирующих установку ОПН на ВЛ, а зарубежные нормативные документы [3] содержат лишь рекомендации общего характера, которые не могут быть использованы для решения конкретной технической задачи. Учитывая изложенное, изучение переходных процессов при грозовых перенапряжениях в ВЛ, изоляция которой защищена подвесными ОПН, является важнейшей нерешенной задачей.

В книге пояснен механизм возникновения грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ, сформулирована и подробно обоснована область рационального применения ОПН для защиты изоляции ВЛ от грозовых перенапряжений, приведен выбор типа и характеристик подвесных ОПН.

1. Перенапряжения на изоляции ВЛ

В нормальном режиме напряжение на изоляции оборудования не должно повышаться сверх наибольшего рабочего напряжения $U_{НР}$. Всякое превышение мгновенным значением напряжения на изоляции амплитуды наибольшего рабочего напряжения $\sqrt{2} \cdot U_{НР}$ принято называть перенапряжением.

В зависимости от причин возникновения различают (рис.1.1) две группы перенапряжений [2]: внешние и внутренние. Внешние перенапряжения являются следствием воздействия внешних по отношению к рассматриваемой сети источников энергии (например, при разрядах молнии). Внутренние перенапряжения развиваются за счет процессов, обусловленных функционированием электрической сети, имеют место при неблагоприятной конфигурации сети, а также вследствие работы коммутационных аппаратов или повреждений изоляции.

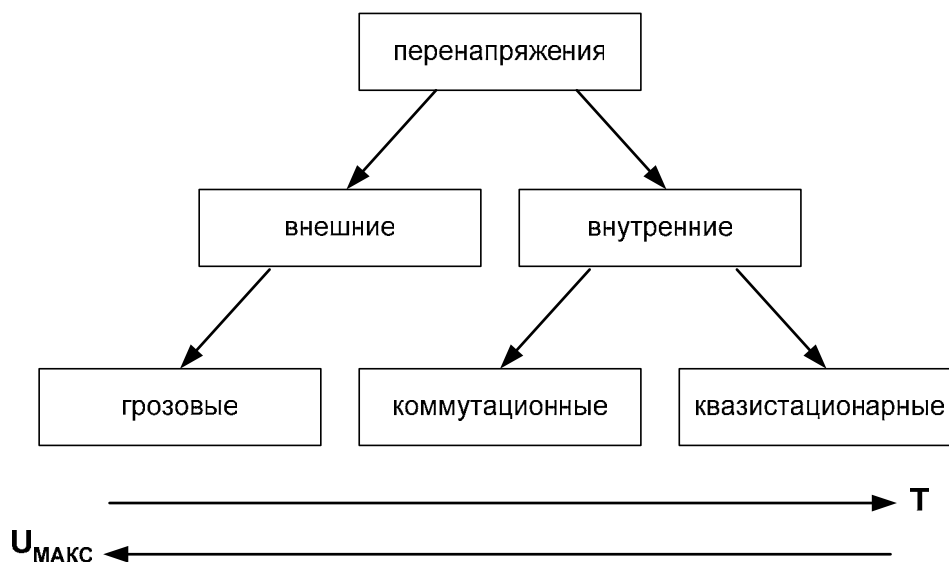


Рис.1.1. Упрощенная классификация перенапряжений.

Перенапряжения характеризуют с точки зрения их максимальной величины $U_{МАКС}$ и одного или нескольких временных параметров T :

- длительности апериодического импульса напряжения;
- периода колебаний напряжения;
- длительности существования повышения напряжения.

Различные виды перенапряжений имеют временные параметры T от единиц микросекунд до нескольких часов. В большинстве случаев перенапряжения имеют кратковременный характер, так как они возникают при быстро затухающих переходных процессах или в аварийных режимах, время существования которых ограничивается действием релейной защиты и автоматики. Даже самые кратковременные перенапряжения способны привести к пробое или перекрытию изоляции и связанной с этим необходимостью последующего отключения поврежденного элемента сети, т.е. к перерывам в электроснабжении потребителей или снижением качества электроэнергии.

Перенапряжения воздействуют и на междуфазную изоляцию, и на изоляцию фаз относительно земли. Наибольшее практическое значение имеют перенапряжения на фазах относительно земли. Они воздействуют на изоляцию, отделяющую токоведущие части электрооборудования от земли и заземленных конструкций. В этом случае на рис.1.2 под величиной $U_{НР}$ следует понимать фазное значение наибольшего рабочего напряжения сети.

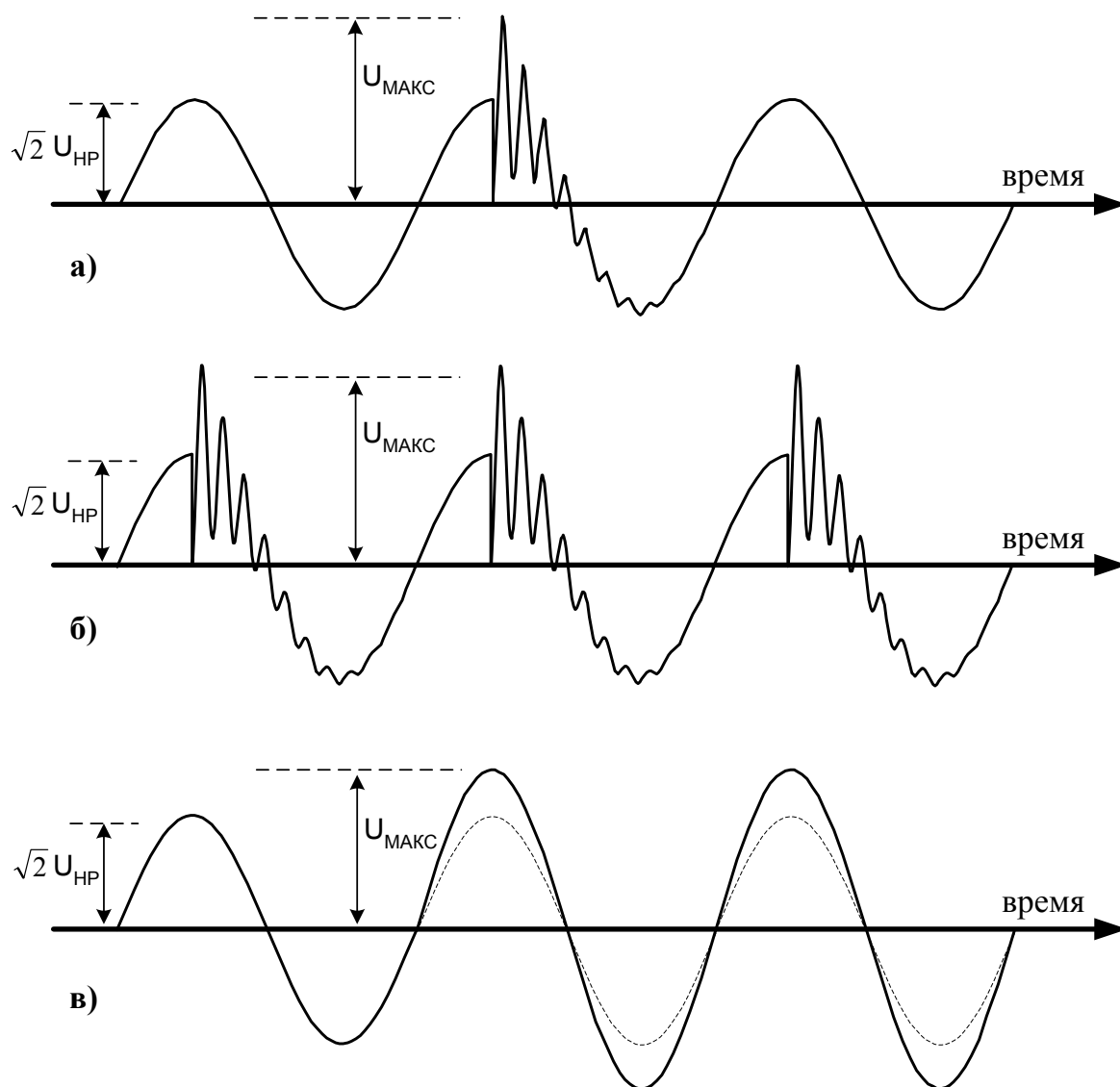


Рис.1.2. Примеры перенапряжений различной формы и временных параметров T .

Для выбранной точки сети интервал времени между импульсными грозовыми и/или импульсными коммутационными перенапряжениями, возникающими в процессе эксплуатации, как правило, достаточно велик, и поэтому их можно считать однократными (рис.1.2,а). Напротив, квазистационарные (как бы стационарные) перенапряжения характеризуются тем, что повышение напряжения повторяется многократно в течение целого ряда периодов промышленной частоты: на рис.1.2,б – это импульсные искажения напряжения промышленной частоты, на рис.1.2,в – это повышение величины самого напряжения промышленной частоты.

Внизу рис.1.1 показано, как изменяются временные параметры и уровни перенапряжений в зависимости от их вида. Для грозовых процессов характерны очень высокие перенапряжения при малой длительности воздействия на изоляцию, для квазистационарных – многократные воздействия на изоляцию при относительно небольшой величине перенапряжений.

При известной величине и форме перенапряжений степень их опасности для рассматриваемой изоляции определяется ее вольт-секундной характеристикой (рис.1.3), в качестве которой можно понимать зависимость 50-и процентного разрядного напряжения $U_{50\%}$ от времени T , прошедшего с начала приложения напряжения до развития разряда (пробоя или перекрытия).

Если точка, отвечающая параметрам $U_{МАКС}$ и T перенапряжений, оказывается выше вольт-секундной характеристики (рис.1.3), то велика вероятность перекрытия (пробоя) изоляции.

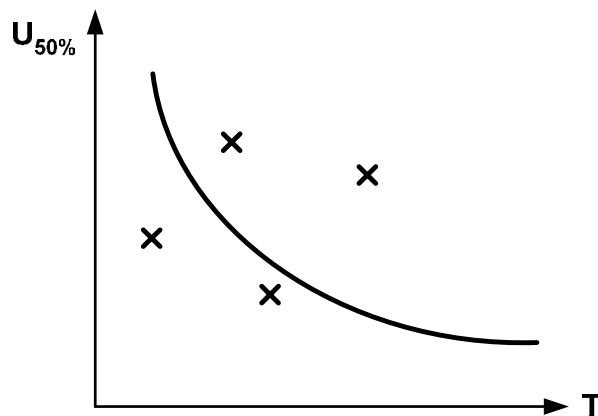


Рис.1.3. Общий вид вольт-секундной характеристики изоляции оборудования, а также различные сочетания величины перенапряжений и их длительности («крестики»).

В процессе эксплуатации отключение воздушных линий может быть вызвано различными причинами, одной из которых являются перекрытия изоляции вследствие перенапряжений, воздействующих на изоляцию фазных проводов. Как правило, при перенапряжениях на воздушных линиях речь идет именно о перекрытии изоляции, а не о пробое. Иными словами, при перекрытии изоляции работоспособность изоляции (и ВЛ в целом) с высокой вероятностью может быть восстановлена после прохождения цикла автоматического повторного включения АПВ, тогда как при пробое изоляции АПВ будет неуспешно, и линию потребуется выводить в ремонт.

При перенапряжениях перекрытия изоляции ВЛ наиболее вероятны на опорах, поскольку там оказывается минимальным расстояние от проводов до заземленных конструкций (траверс и стоек опоры), определяемое классом напряжения линии, применяемыми типами опор и изолирующих подвесок (изоляторов) фазных проводов.

Вероятность перекрытия изолирующей подвески определяется многими факторами и, в том числе, величиной и формой воздействующих перенапряжений. Внешние (грозовые) и внутренние (коммутационные,

квазистационарные) перенапряжения обладают различными параметрами, но опыт эксплуатации, испытания и расчеты показывают, что из всех перенапряжений причиной перекрытия изоляции наиболее часто становятся грозовые перенапряжения. Именно поэтому обобщенное понятие «защита изоляции ВЛ от перенапряжений» нередко отождествляют с его частным случаем: «защитой изоляции ВЛ от грозовых перенапряжений».

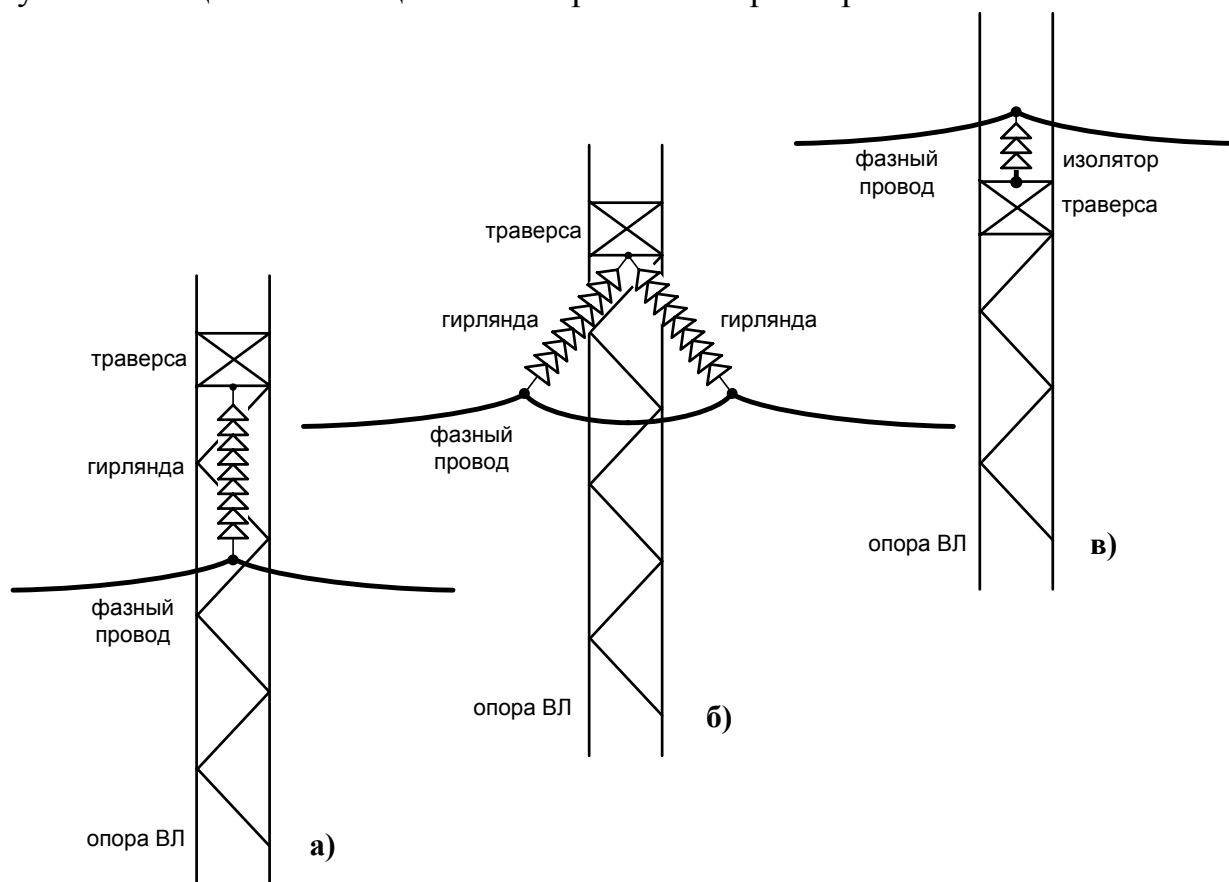


Рис.1.4. Наиболее распространенные изолирующие подвески фазных проводов ВЛ 6-750 кВ: подвесная (а) и натяжная (б) гирлянды изоляторов; штыревой изолятор (в).

На самом деле перенапряжения являются лишь одной из причин нарушения нормальной работы воздушных линий и их отключения. Среди причин так же известны:

- перекрытия увлажненной изоляции под рабочим напряжением;
- «птичьи» отключения (перекрытия загрязненной изоляции, перекрытия по струе помета, перекрытия из-за крупных птиц);
- перекрытия на деревьях;
- перекрытия изоляции при лесных и степных пожарах;
- пробой изоляции;
- расстрел изоляции охотниками;
- обрыв фазных проводов и тросов (с падением на фазные провода) из-за вибрации, нерасчетных ветровых и гололедных нагрузок;
- падение опор из-за нерасчетных ветровых и гололедных нагрузок;
- наезд техники на ВЛ (обрыв проводов и тросов, падение опор);
- другие причины.

Итак, перенапряжения и, в частности, грозовые перенапряжения далеко не всегда являются доминирующими в числе отключений конкретной воздушной линии. Число отключений ВЛ из-за воздействия грозовых перенапряжений зависит от ряда факторов [2,3], таких как:

- число разрядов молнии в ВЛ и рядом с ней;
- импульсная прочность изоляции ВЛ;
- импульсное сопротивление заземления опор ВЛ;
- наличие молниезащитных тросов (их число и расположение относительно фазных проводов);
- наличие на ВЛ специальных средств для ограничения перенапряжений (например, ограничителей перенапряжений нелинейных ОПН).

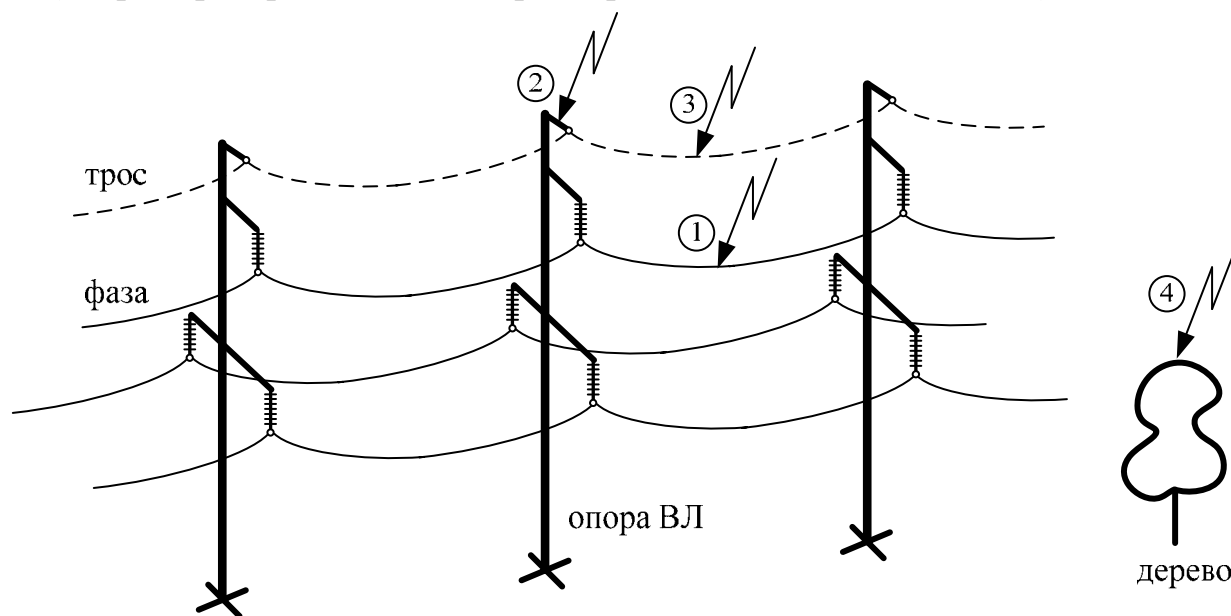


Рис.1.5. Разряды молнии – причины грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ.

Основными источниками грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ, как это показано на рис.1.5, являются следующие воздействия молнии:

- прямые разряды в ВЛ (в фазный провод – 1, в опору – 2, в трос – 3);
- разряды вблизи от ВЛ (в землю или в какие-то объекты – 4).

В случаях 1,2,3 говорят, что на изоляции ВЛ имеют место перенапряжения прямого разряда молнии, а в случае 4 – индуктированные перенапряжения. Физике молнии лучше соответствует «разряд», однако зачастую используется «удар».

При заданных параметрах молнии перенапряжения прямого разряда опаснее для изоляции, нежели индуктированные перенапряжения. Однако вероятность прямого разряда молнии ВЛ зависит от многих факторов, и может получиться так, что вовсе не прямые разряды молнии являются основной причиной перекрытия изоляции при грозовых перенапряжениях, а индуктированные. В частности, такая ситуация складывается в сетях 6-10 кВ, где высота опоры невелика и трасса ВЛ хорошо экранируется рельефом местности, лесом и постройками, т.е. ВЛ 6-10 кВ не является привлекательной для формирования на нее разряда молнии. Поэтому в сетях 6-10 кВ основной

причиной грозových отключений ВЛ считаются индуктированные перенапряжения при близких к трассе линии разрядах молнии.

Существуют различные методики [2,3,17,18] для оценки числа разрядов молнии в ВЛ, оценки числа разрядов в элементы ее конструкции (точки 1,2,3 на рис.1.5). Реальное число разрядов молнии в ВЛ зависит от многих факторов, не все из которых можно учесть при проведении расчетов, т.е. слово «расчет» корректнее заменить словом «оценка».

При оценках числа разрядов молнии в ВЛ основные традиционно учитываемые факторы следующие:

- грозовая активность в районе прохождения ВЛ, выражаемая или средним числом разрядов молнии на единицу площади земной поверхности (на 1 км²), или так называемым годовым «числом дней с грозой», или так называемым годовым «числом грозových часов»;
- площадь, занимаемая линией (зависит от длины ВЛ и ширины ее трассы, которая в свою очередь зависит от типа опор);
- высота опор, определяющая «тень», отбрасываемую линией (разряды молнии в землю возможны лишь на некотором удалении от трассы ВЛ, так как в противном случае их можно считать прямыми разрядами в ВЛ).

Факторы, которые сложно учесть при оценках конкретного числа разрядов молнии в ВЛ, описаны в теории избирательной поражаемости [19,20]:

- наличие по трассе отдельных высоких опор;
- переходы ВЛ через водные преграды;
- пересечения ВЛ с другими ВЛ;
- изгибы трассы ВЛ и изгибы идущих параллельно линий или трубопроводов;
- места по трассе, где меняется характер грунта и уровень грунтовых вод;
- характер местности (лес/поле/горы) и наличие строений.

Учитывая изложенное, существующим методикам можно более менее доверять лишь в случае их использования для протяженных, сравнительно высоких и габаритных ВЛ 35-750 кВ, число разрядов в которые не столь сильно зависит от характера местности, как для ВЛ 6-10 кВ.

Здесь следует обратить внимание, что традиционно классы номинального напряжения разделяют на группы в зависимости от способа заземления нейтрали, который в России отличается для сетей 6-35 кВ и сетей 110-750 кВ. При рассмотрении же грозových перенапряжений важным фактором является высота опоры, возможность установки на ней молниезащитного троса, и, поэтому, разделение воздушных линий на 6-10 кВ и 35-750 кВ является логичным. Заметим, что в России есть такие классы, как 20 кВ, 150 кВ и др., однако в книге основное внимание уделено сетям 6-10, 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ, которые автор считает наиболее интересными для широкого круга читателей.

Рассмотрим более подробно механизм возникновения грозových перенапряжений на изоляции воздушных линий при разрядах молнии в точки 1,2,3,4, показанные на рис.1.5.

1.1. Разряд молнии в фазный провод ВЛ

На рис.1.6-1.7 показаны различные конструкции опор ВЛ 6-750 кВ и отмечены фазы, в которые наиболее вероятны разряды молнии:

- в любые провода для достаточно компактных ВЛ 6-10 кВ;
- в верхние провода при расположении фаз в вершинах треугольника или при вертикальном расположении фаз;
- в крайние провода при горизонтальном расположении фаз.

Для остальных фаз вероятность разряда молнии есть, но она заметно ниже и, иногда, прорывы молнии на них вообще не принимаются во внимание.

Табл.1.1. Типовые опоры ВЛ 6-750 кВ и область их применения.

Эскиз опоры	Классы напряжения линии	Возможность установки троса	Расположение фаз друг относительно друга
Рис.1.6,а	6-10 кВ	нет	в вершинах треугольника
Рис.1.6,б		есть	горизонтальное
Рис.1.7,а	35-330 кВ		в вершинах треугольника
Рис.1.7,б			вертикальное
Рис.1.7,в	35-750 кВ		горизонтальное

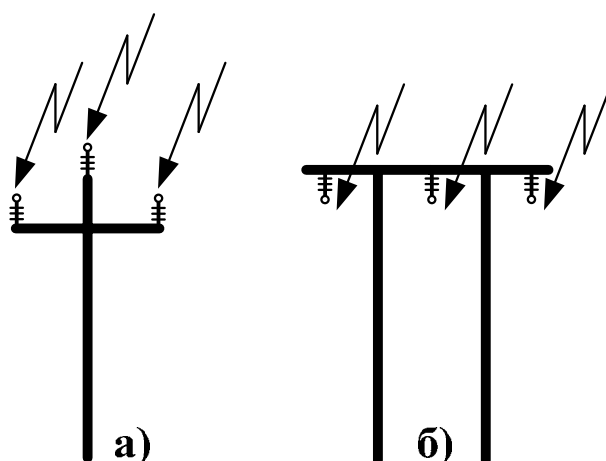


Рис.1.6. Фазные провода ВЛ 6-10 кВ, в которые наиболее вероятны прямые разряды молнии.

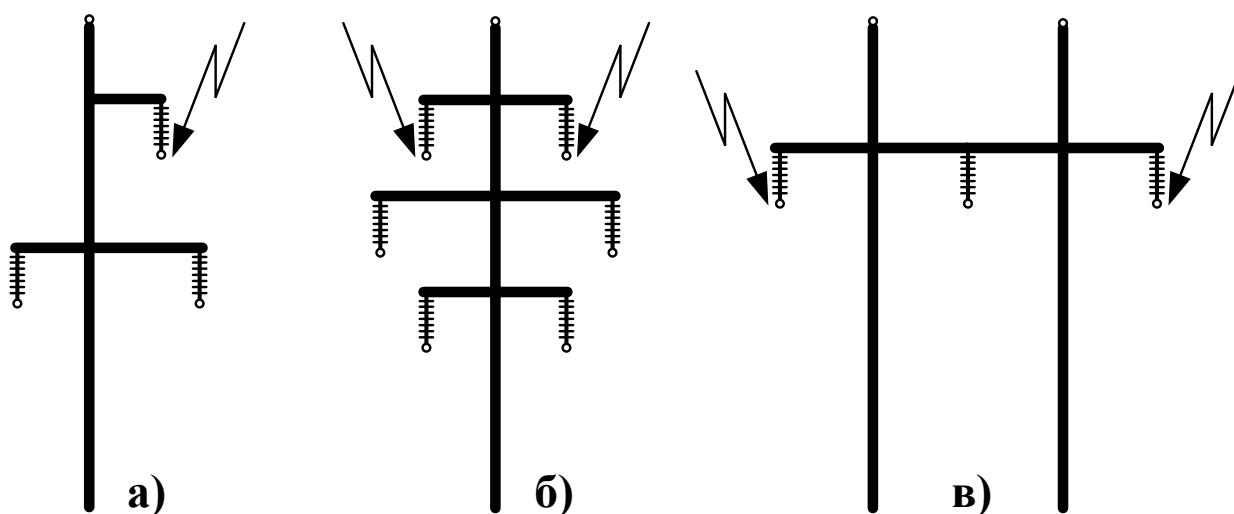


Рис.1.7. Фазные провода ВЛ 35-750 кВ, в которые вероятны прямые разряды молнии.

При разряде молнии $i_M(t)$ в фазный провод ток молнии (волна тока) будет распространяться влево и вправо от места разряда (рис.1.8-1.9):

$$u_\phi(t) = \frac{Z_B}{2} \cdot i_M(t),$$

где Z_B – волновое сопротивление фазного провода [2].

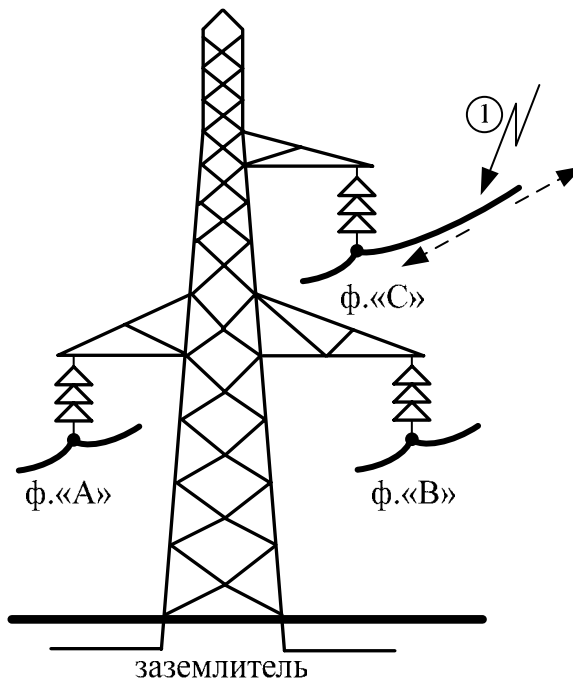


Рис.1.8. Разряд молнии в фазный провод ВЛ и пути растекания тока молнии.

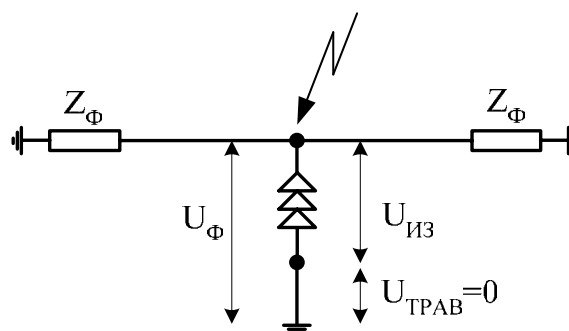


Рис.1.9. Упрощенная схема замещения для определения грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ в условиях рис.1.8 при разряде молнии в фазный провод.

При упрощенном аналитическом исследовании числа отключений ВЛ важно соотношение перенапряжений и прочности изоляции, определяющее наличие или отсутствие перекрытия. Поскольку следующие за перекрытием процессы сейчас не так важны, то достаточно рассматривать «неограниченные» грозовые перенапряжения, т.е. без учета перекрытий изоляции.

Ток в опоре и ее заземляющем устройстве появится лишь при перекрытии изоляции фазы «С», пораженной молнией. Следовательно, для оценки неограниченных перенапряжений, существующих до перекрытия изоляции,

достаточно считать потенциал траверсы фазы «С» равным нулевому потенциалу земли $u_{TPAB}(t) = 0$. Тогда напряжение на изоляции фазного провода, равное разности потенциалов фазного провода $u_\phi(t)$ и траверсы опоры $u_{TPAB}(t)$:

$$u_{ИЗ}(t) = u_\phi(t) - u_{TPAB}(t) = \frac{Z_B}{2} \cdot i_M(t). \quad (1.1)$$

Условием перекрытия изоляции ВЛ можно считать $u_{ИЗ}(t) > u_{ИМП}$, т.е. определенное превышение грозowymi перенапряжениями импульсной прочности изоляции (или 50% разрядного напряжения).

Даже если импульсный ток $i_M(t)$ молнии имеет максимальное значение всего $I_M = 10$ кА, то при неком среднем значении волнового сопротивления фазного провода $Z_B = 400$ Ом получим, что максимальное напряжение на изоляции достигнет $U_\phi = 2000$ кВ и окажется достаточным для перекрытия изоляции ВЛ всех классов номинального напряжения вплоть до 330 кВ (см. табл.1.2).

Учитывая данные по величинам токов молнии [1,2], прямой разряд молнии в фазный провод ВЛ любого класса напряжения с высокой вероятностью приведет к перекрытию ее изоляции и потребует отключения ВЛ.

Табл.1.2. Строительная длина $L_{ИЗ}$ (по [21]) гирлянды изоляторов ВЛ 6-750 кВ и ее разрядное напряжение $U_{50\%}$ (по [2]) при воздействии стандартного грозового импульса 1.2/50 мкс.

$U_{НОМ}$, кВ	6-10	35	110	220	330	500	750
$L_{ИЗ}$, м	0.1-0.2	0.7	1.25	2.3	3.0	4.0	6.0
$U_{50\%}$, кВ	80-180	500	750	1300	1850	2350	2900

Примечание: для ВЛ 6-10 кВ данные существенно зависят от типа применяемых изоляторов.

Поскольку прямые разряды молнии в ВЛ наиболее вероятны для линий 35-750 кВ, возвышающихся над местностью и «привлекательных» для молнии, то ощутимое повышение грозоупорности ВЛ 35-750 кВ достигается установкой над фазными проводами молниезащитных тросов, присоединенных к опорам ВЛ. Роль таких тросов, иногда называемых «грозозащитными», – перевести заведомо опасные для изоляции разряды молнии в токоведущие части ВЛ в гораздо менее опасные разряды молнии в заземленные элементы конструкции.

Существуют исследования [20], согласно которым на фазные провода линий с тросами прорываются лишь маломощные молнии – им проще обойти тросовую защиту, чем «менее поворотливым» мощным молниям, которые скорее ударят в заземленные части ВЛ. Если принимать во внимание эти данные, то после установки тросовой защиты уже не каждый разряд молнии в фазный провод ВЛ 500-750 кВ будет приводить к перекрытию изоляции.

На формирование разряда молнии на фазный провод определенное влияние может оказывать полярность рабочего напряжения промышленной частоты. Так, на территории России молния несет к земле в большинстве случаев отрицательный заряд, поэтому для заданного фазного провода разряд скорее произойдет тогда, когда мгновенное значение напряжения на этом

проводе близко к амплитуде положительной полуволны синусоиды 50 Гц. Однако расчеты и опыт эксплуатации сетей показывают, что учет рабочего напряжения при оценке вероятности прорыва молнии на фазный провод необходимо проводить лишь для линий 500-750 кВ.

Если говорить о линиях 6-10 кВ, то прочность их изоляции такова, что перекрытия происходят при каждом прямом разряде молнии в ВЛ – неважно куда именно: в фазный провод, в опору или трос (если бы он устанавливался). Поэтому в сетях этих классов напряжения низка эффективность троса как меры снижения числа перекрытий изоляции при прямых разрядах молнии: есть трос или нет, а перекрытия при прямых разрядах в ВЛ будут с высокой вероятностью. Несмотря на это, в некоторых зарубежных странах можно встретить ВЛ 6-10 кВ с установленной тросовой защитой: в подобных ситуациях на заземленный трос возлагается задача снижения индуктированных перенапряжений (трос заземлен и снижает наведенный потенциал на фазные провода), что будет пояснено в параграфе 1.4.

Остановимся подробнее на ВЛ 35-750 кВ, для изоляции которых индуктированные перенапряжения не представляют опасности, а главная цель установки троса – перевод разрядов молнии с токоведущих на заземленные части ВЛ (рис.1.10).

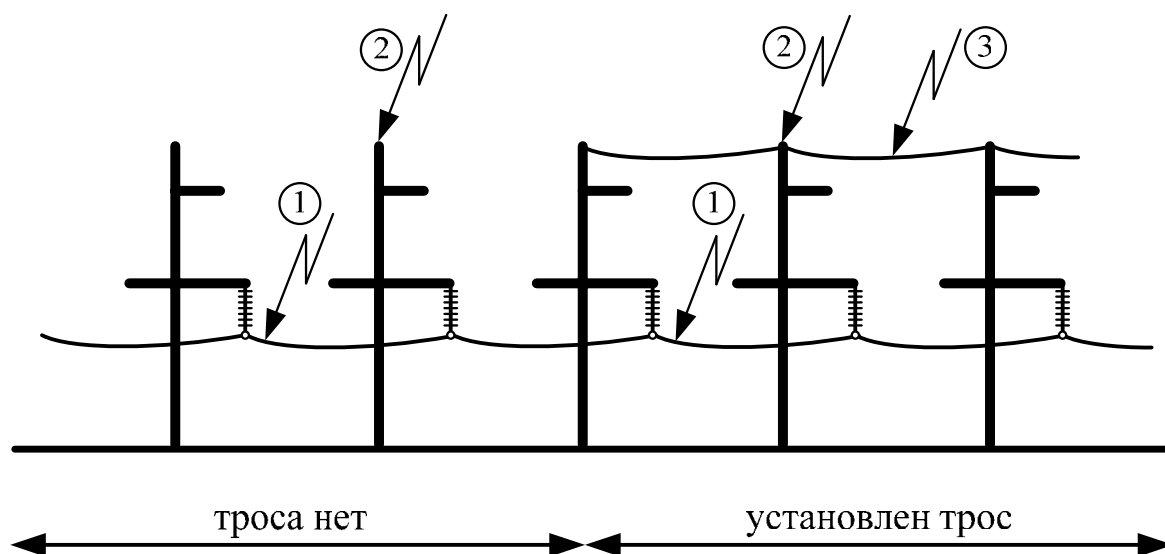


Рис.1.10. Основные места разряда молнии в ВЛ 35-750 кВ с тросом и без него.

Если принять число разрядов молнии в ВЛ равным единице, то общее представление о долях разрядов молнии в точки 1,2,3, показанные на рис.1.10, можно получить, ознакомившись с табл.1.3, составленной с использованием ряда методик [2,3 и др]. Видно, что установка троса снижает вероятность разрядов молнии в фазные провода в сотни раз, приводя в ряде случаев к ощутимому повышению грозоупорности воздушных линий 35-750 кВ.

Табл.1.3. Доли разрядов молнии в различные элементы воздушной линии рис.1.5.

Точка	Место разряда молнии	Троса нет	Установлен трос
1	фазный провод	0.5	0.005
2	опора (или трос вблизи от опоры)	0.5	≈ 0.5
3	трос в средней части пролета	-	≈ 0.5
Итого		1.0	1.0

Если трос непосредственно присоединен к каждой опоре, то в замкнутых контурах, показанных пунктиром на рис.1.11,а, в нормальном режиме работы ВЛ будут протекать паразитные токи промышленной частоты, вызванные переменным магнитным полем токов фазных проводов, и приводящие к увеличению потерь мощности ВЛ, коррозии тросов. Поэтому для борьбы с паразитными токами на практике присоединение тросов к опорам осуществляется через изоляторы – например как показано на рис.1.11,б.

В нормальном режиме работы контуры для протекания паразитных токов оказываются разомкнутыми, однако при разрядах молнии в опоры и тросы ВЛ указанные изоляторы легко перекрываются, присоединяя тросы к заземленным опорам и обеспечивая стекание токов молнии через тело опоры в ее заземляющее устройство.

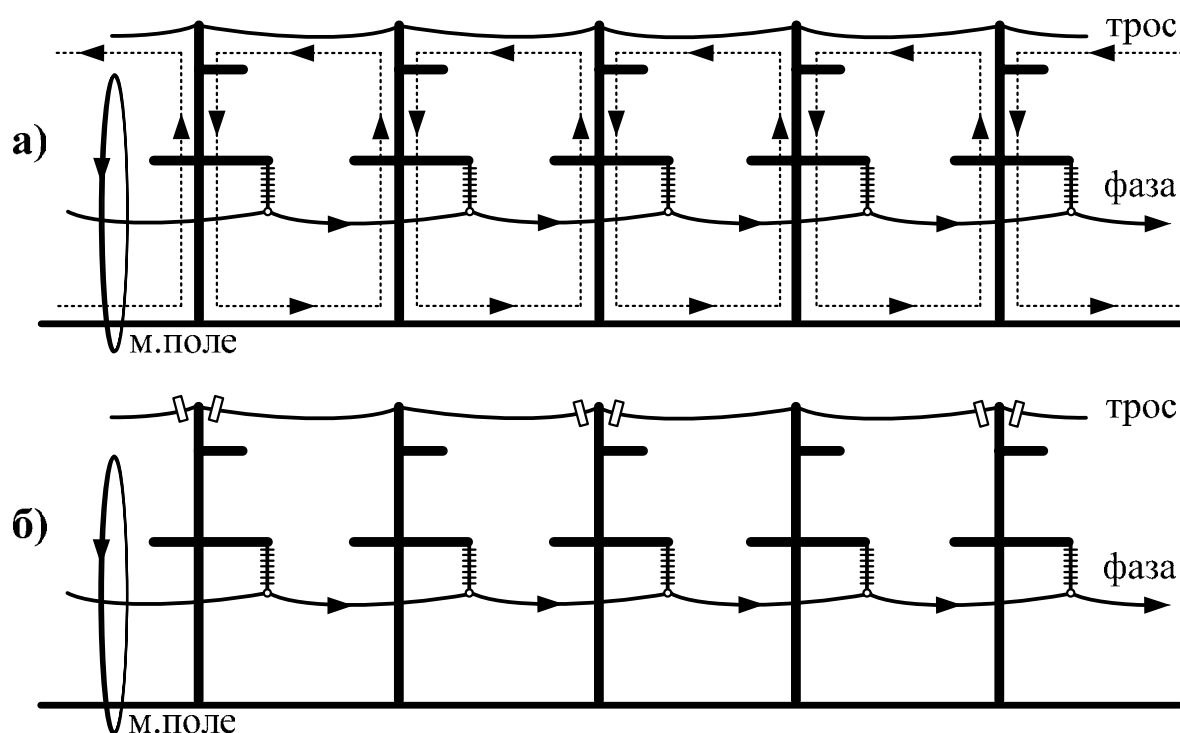


Рис.1.11. Различные способы крепления троса к опорам ВЛ: глухое (а), через изоляторы (б).

На ВЛ 35-750 кВ эффективность тросовой защиты определяется тем, насколько низка вероятность прорыва молнии на фазные провода. Эта вероятность зависит от ряда факторов: числа тросов, угла α тросовой защиты

(рис.1.12), высоты стойки опоры от верхней траверсы до места крепления троса, величины и полярности фазного напряжения, заряда в канале молнии (предполагаемого тока молнии). Учет перечисленных факторов в методиках [2,3 и др.] производится по-разному и дает отличные друг от друга результаты, однако для инженерных оценок данные табл.1.3 вполне достаточны.

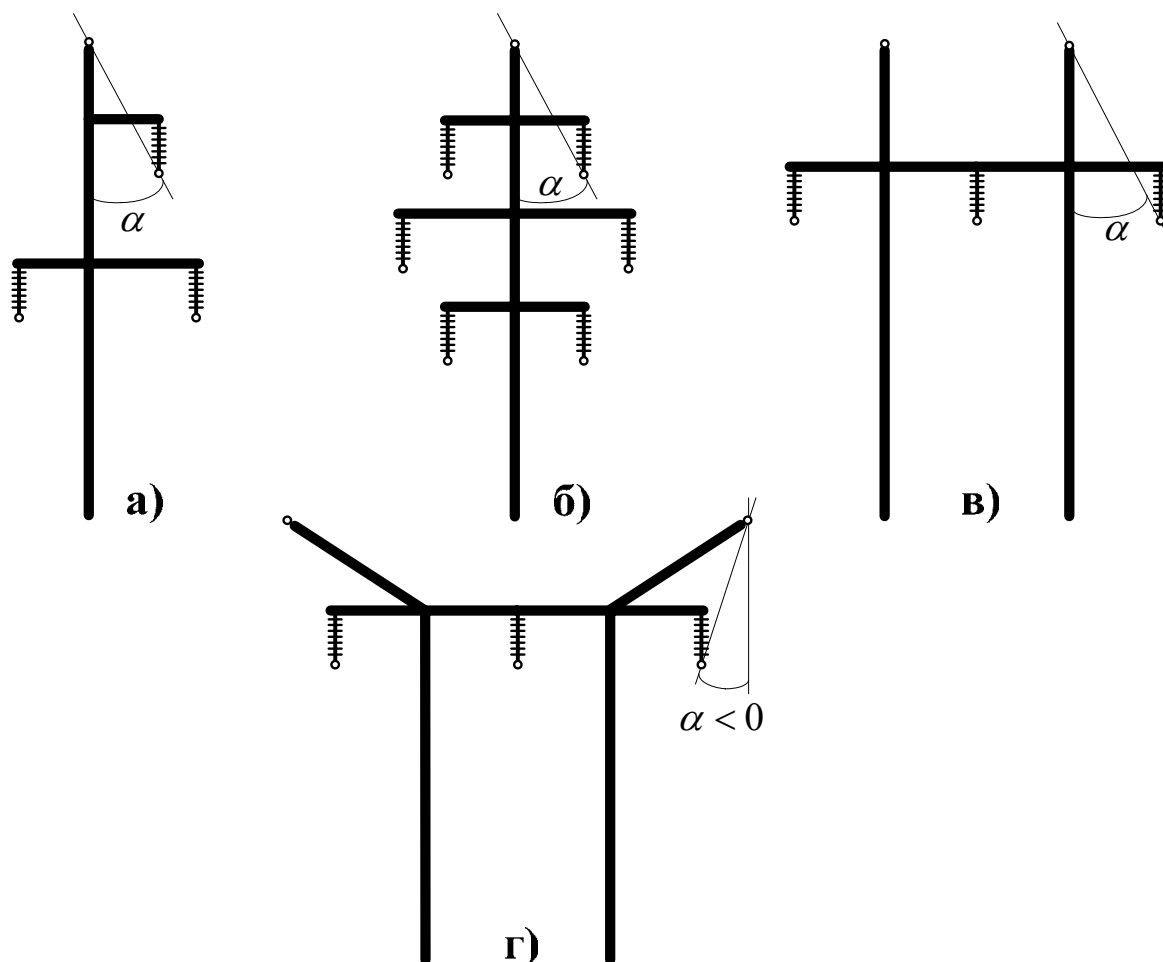


Рис.1.12. Определение угла α тросовой защиты на опоре воздушной линии (минимальная вероятность прорыва молнии достигается для случая «г»).

1.2. Разряд молнии в опору ВЛ без троса

Рассмотрим разряды молнии в опору вида рис.1.13,а. Как видно, ток молнии проходит по телу опоры и стекает в землю через ее заземляющее устройство. Напряжение на изоляции фазного провода $u_{ИЗ}(t) = u_{\phi}(t) - u_{ТРАВ}(t)$ равно разности потенциалов фазного провода и траверсы (рис.1.14,а).

Потенциал траверсы $u_{ТРАВ}(t)$ – это сумма падений напряжений на сопротивлении R_3 заземляющего устройства опоры и на индуктивности $L_{ТРАВ}$ участка опоры от рассматриваемой траверсы до земли

$$u_{ТРАВ}(t) = R_3 \cdot i_M(t) + L_{ТРАВ} \frac{di_M(t)}{dt},$$

где $L_{ТРАВ}$ будет различна для верхних и нижних фаз опоры, но может быть определена как $L_{ТРАВ} = h_{ТРАВ} \cdot L_{ОП}^*$, где $h_{ТРАВ}$ – расстояние от заданной траверсы до земли; $L_{ОП}^* = 0.5 \div 1.0$ мкГн/м – индуктивность опоры на единицу длины.

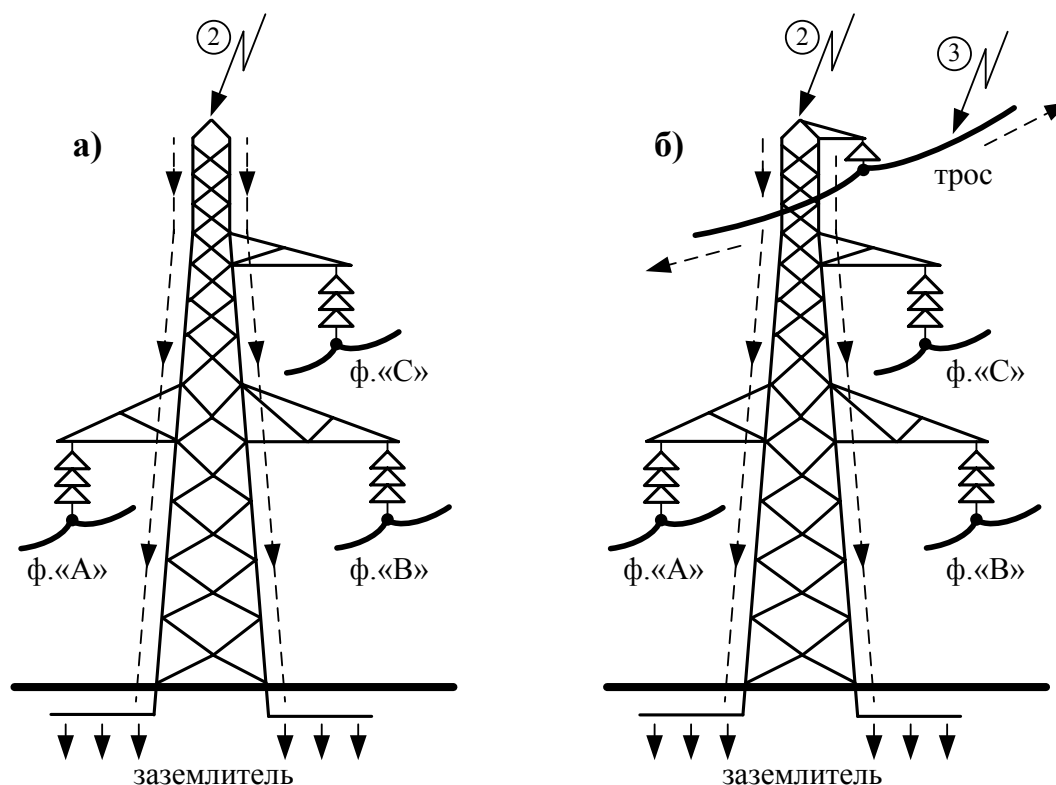


Рис.1.13. Пути растекания тока молнии при разряде в опору линии без тросовой защиты (а) и с тросовой защитой (б).

При разряде молнии в опору линии без троса потенциал фазного провода $u_{\phi}(t)$ определяется лишь одним фактором – мгновенным значением напряжения промышленной частоты этой фазы. Так как величина и знак напряжения 50 Гц на фазных проводах носят случайный характер (разряды молнии в опору равновероятны и при положительной, и при отрицательной полярности напряжения 50 Гц), то, не теряя общности, можно принять $u_{\phi}(t) = 0$. Тогда

$$u_{ИЗ}(t) = u_{\phi}(t) - u_{ТРАВ}(t) = - \left(R_3 \cdot i_M(t) + L_{ТРАВ} \frac{di_M(t)}{dt} \right). \quad (1.2)$$

Условием перекрытия изоляции ВЛ можно считать $u_{из}(t) > u_{имп}$, т.е. определенное превышение грозowymi перенапряжениями импульсной прочности изоляции (или 50% разрядного напряжения).

При разряде молнии в заземленную часть ВЛ причиной перекрытия изоляции становится опасное для изоляции повышение импульсного потенциала на траверсе и, поэтому, в таких случаях говорят об «обратных» перекрытиях, т.е. перекрытиях с заземленной части электроустановки на токоведущую.

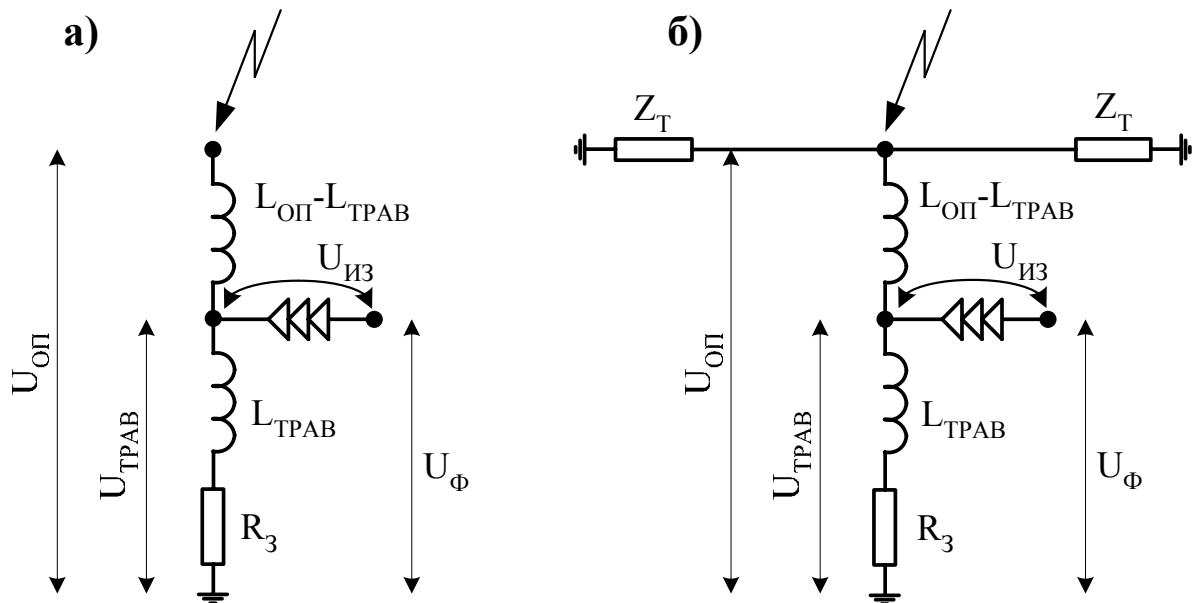


Рис.1.14. Упрощенная схема замещения для определения грозowych перенапряжений на изоляции ВЛ при разряде в опору линии без тросовой защиты (а) и с тросовой защитой (б).

Согласно (1.2) вероятность перекрытия изоляции тем выше, чем больше:

- ток молнии $i_M(t)$ (он максимален для первой компоненты молнии [1,2]);
- скорость изменения тока молнии $di_M(t)/dt$ (она максимальна на фронте импульса и максимальна для последующих компонент многокомпонентной молнии [1,2]).

Для заданного параметров тока молнии $i_M(t)$ и $di_M(t)/dt$ вероятность обратного перекрытия по (1.2) зависит от:

- индуктивности участка опоры до траверсы рассматриваемой фазы;
- от сопротивления заземления опоры.

Индуктивность опоры. При разряде в опору ВЛ, не имеющей троса (рис.1.13,а), наибольшая вероятность перекрытия изоляции будет для верхней фазы, поскольку в формуле (1.2) именно для нее самая большая индуктивность участка опоры от траверсы до земли. Пусть верхняя траверса расположена на высоте $h_{ТРАВ} = 20$ м, а погонная индуктивность опоры составляет $L_{ОП}^* = 1$ мГн/м. Тогда $L_{ТРАВ} = 20$ мкГн и при скорости изменения импульса тока молнии, скажем, $di_M(t)/dt = 50$ кА/мкс найдем $L_{ТРАВ} \cdot di_M(t)/dt = 1000$ кВ (рис.1.15,а). Импульсная прочность изоляции (табл.1.2) такова, что становится ясно: при разрядах молнии в опору даже при идеальном заземляющем устройстве $R_3 = 0$ заметная

вероятность перекрытия изоляции существует для воздушных линий класса напряжения вплоть до 220 кВ.

Заземлитель опоры. При сопротивлении заземления опоры $R_3 = 20$ Ом и величине $I_M = 50$ кА импульсного тока молнии получим $R_3 \cdot I_M = 1000$ кВ (рис.1.15,б). Даже без учета падения напряжения на индуктивности опоры видно, что заметная вероятность перекрытия изоляции существует для воздушных линий класса напряжения вплоть до 220 кВ.

Следует понимать, что ток молнии $i_M(t)$ и скорость его изменения $di_M(t)/dt$ достигают максимальных значений в разные моменты времени. Поэтому некорректно напрямую складывать приведенные выше оценки составляющих формулы (1.2). Тем не менее, можно показать, что разряды молнии в типовые опоры ВЛ без троса при типовых сопротивлениях заземления $R_3 = 10 \div 30$ Ом являются важной причиной перекрытия изоляции ВЛ вплоть до класса 330 кВ. Для ВЛ 500-750 кВ считаться с обратными перекрытиями приходится лишь в случае высоких опор или опор с повышенным сопротивлением заземления.

Для ВЛ 6-10 кВ при разрядах в опору перекрытия гарантированы даже при минимальных сопротивлениях заземления и, следовательно, снижение сопротивления заземления не является мерой повышения их грозоупорности.

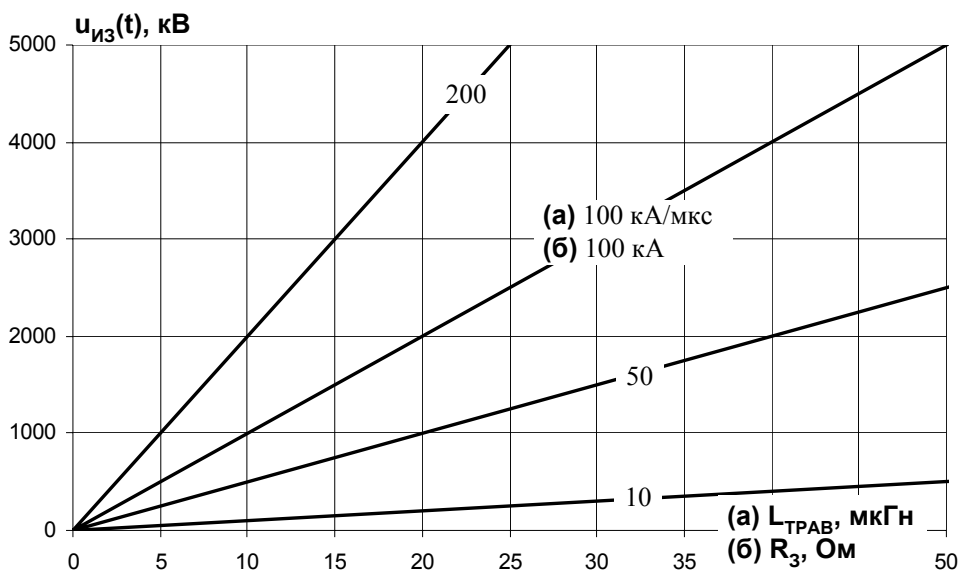


Рис.1.15. Разряд молнии в опору ВЛ без троса. Показаны индуктивная (а) и резистивная (б) составляющие формулы (1.2) для напряжения на изоляции ВЛ в зависимости от скорости изменения (а) импульсного тока молнии и от его величины (б).

1.3. Разряд молнии в трос ВЛ

При наличии установленного троса разряды молнии наиболее вероятны именно на него (табл.1.3). Часть из разрядов может прийтись на участок троса в средней части пролета, а часть – на участок троса вблизи от опоры и, в таком случае, можно считать, что имеет место разряд непосредственно в опору. При прочих равных перенапряжения на изоляции выше при разрядах в опору, так как при разрядах в средней части пролета в отведении тока молнии без временной задержки участвуют одновременно обе опоры, ограничивающие пролет. С учетом этого, а также для удобства получения простейших оценок, рассмотрим разряд молнии вблизи от опоры – схема рис.1.13,б.

Как видно, часть тока молнии проходит по телу опоры и стекает в землю через ее заземляющее устройство, а другая часть – направляется по тросу к соседним опорам. Напряжения на изоляции $u_{ИЗ}(t) = u_{\phi}(t) - u_{ТРАВ}(t)$ равно разности потенциалов фазного провода и траверсы (рис.1.14,б).

Потенциал траверсы $u_{ТРАВ}(t)$ – это сумма падений напряжений на сопротивлении R_3 заземляющего устройства опоры и на индуктивности $L_{ТРАВ}$ участка опоры от рассматриваемой траверсы до земли

$$u_{ТРАВ}(t) = R_3 \cdot i_{ОП}(t) + L_{ТРАВ} \frac{di_{ОП}(t)}{dt},$$

где $i_{ОП}(t)$ и $di_{ОП}(t)/dt$ – ток в рассматриваемой опоре и его производная.

При наличии троса потенциал фазного провода $u_{\phi}(t)$ определяется не только мгновенным значением напряжения 50 Гц, среднее значение которого принято равным нулю, но и наводками от троса. Потенциал троса, равный потенциалу вершины опоры $u_{ОП}(t)$, приводит к наведению потенциала на фазных проводах $u_{\phi}(t) = K_{\phiТ} \cdot u_{ОП}(t)$, где $K_{\phiТ} = 0.1 \div 0.3$ – коэффициент связи указанных напряжений, величина которого дана в [2]. Тогда можно получить

$$u_{ИЗ}(t) = K_{\phiТ} \left(R_3 \cdot i_{ОП}(t) + L_{ОП} \frac{di_{ОП}(t)}{dt} \right) - \left(R_3 \cdot i_{ОП}(t) + L_{ТРАВ} \frac{di_{ОП}(t)}{dt} \right),$$

$$u_{ИЗ}(t) = - \left((1 - K_{\phiТ}) \cdot R_3 \cdot i_{ОП}(t) + (L_{ТРАВ} - K_{\phiТ} \cdot L_{ОП}) \cdot \frac{di_{ОП}(t)}{dt} \right). \quad (1.3)$$

Условием перекрытия изоляции ВЛ можно считать $u_{ИЗ}(t) > u_{ИМП}$, т.е. определенное превышение грозowymi перенапряжениями импульсной прочности изоляции (или 50% разрядного напряжения).

Сравнение выражений (1.3) и (1.2) показывает, что при разрядах молнии в опору наличие троса приводит к снижению перенапряжений на изоляции:

- поскольку в опоре протекает ток $i_{ОП}(t)$, меньший тока молнии $i_M(t)$;
- поскольку $K_{\phiТ} \neq 0$, т.е. возрастает не только потенциал опоры, троса, траверсы, но и потенциал фазного провода, что вызвано наводками с троса.

Величина перенапряжений по (1.3) зависит от расположения фазы на опоре: чем ближе фаза к тросу, тем больше (ближе к единице) коэффициент связи $K_{\phiТ}$, но меньше индуктивность участка опоры $L_{ТРАВ}$: например, в обозначениях рис.1.13,б имеем $K_{\phiТ}^A < K_{\phiТ}^B < K_{\phiТ}^C$ и $L_{ТРАВ}^A = L_{ТРАВ}^B < L_{ТРАВ}^C$.

Если для линии без троса рис.1.13,а при разрядах молнии в опору наибольшим перенапряжениям всегда подвергалась верхняя фаза «С», то для линии с тросом рис.1.13,б указать такую фазу без проведения уточняющих расчетов не представляется возможным. Тем не менее, уже ясно, что наличие троса не только снижает вероятность заведомо опасного разряда молнии в фазные провода, но и снижает вероятность перекрытия при разрядах молнии в заземленные части ВЛ.

Иногда, достаточно редко, можно встретить предложения устанавливать трос не только над фазными проводами, но и под фазными проводами. Эффективность такого решения обусловлена повышением коэффициентов связи $K_{от}$ фазных проводов с заземленными тросами, а значит снижением перенапряжений на изоляции при разрядах молнии в заземленные части ВЛ.

В некоторых зарубежных странах можно встретить трос на воздушных линиях 6-10 кВ, однако, как будет показано далее, он эффективен лишь для снижения индуктированных перенапряжений, поскольку при прямых разрядах молнии в ВЛ 6-10 кВ перекрытия изоляции вряд ли удастся избежать и при отсутствии троса, и при его наличии.

1.4. Разряд молнии рядом с ВЛ

Возникновение перенапряжений на изоляции возможно не только при прямых разрядах молнии в ВЛ, но и при «удаленных» за счет эффекта электромагнитной индукции: ток в канале молнии возбуждает переменное магнитное поле, которое наводит эдс в различных контурах линии (рис.1.16).

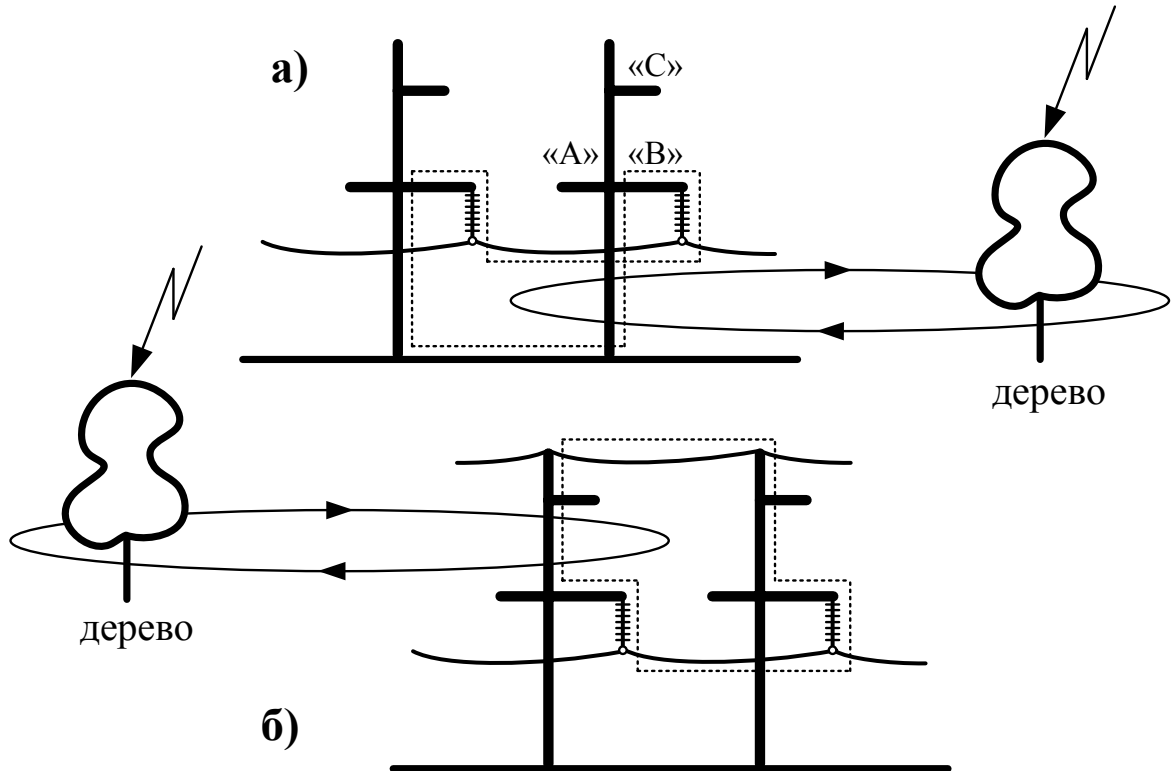


Рис.1.16. Возникновение на изоляции ВЛ индуктированных перенапряжений за счет взаимной индуктивности между каналом молнии и контуром, включающим изоляцию ВЛ: для линии без троса (а), для линии с тросом (б).

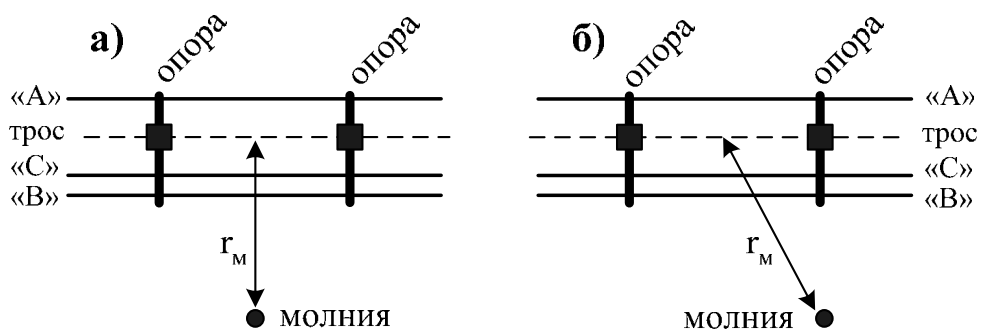


Рис.1.17. Вид сверху на трассу одноцепной ВЛ и упрощенное определение расстояния r_M от молнии до контура «опора-фаза-опора»: разряд молнии на равном удалении от ближайших опор (а), разряд молнии вблизи от одной из опор (б).

Индукция магнитного поля на расстоянии r от канала молнии составит

$$B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi \cdot r} i_M(t),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха (вакуума).

Пусть r_M – некоторое среднее расстояние от места разряда молнии до контура «опора-фаза-опора», которое можно определить в соответствии с рекомендациями рис.1.17. Тогда эдс, наведенная в контуре площади S , показанном на рис.1.16, составит

$$e(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt} \approx -S \frac{\mu_0}{2\pi \cdot r_M} \frac{di_M(t)}{dt},$$

а напряжение на каждом из двух изоляторов, оказавшихся в контуре

$$u_{из}(t) = \left| \frac{e(t)}{2} \right| = S \frac{\mu_0}{4\pi \cdot r_M} \frac{di_M(t)}{dt}. \quad (1.4)$$

Оценки уровня индуктированных перенапряжений на изоляции ВЛ, выполненные по (1.4), приведены на рис.1.18. В расчеты была заложена площадь контура $S = 1000 \text{ м}^2$, которая для линии без троса (рис.1.16,а) соответствует, скажем, длине пролета 100 м и средней высоте подвеса фазного 10 метров (нечто среднее между типовыми ВЛ 6-10 и ВЛ 35 кВ).

При малых $r_M < 5 \div 10$ м можно сказать, что имеет место разряд молнии непосредственно в ВЛ 6-35 кВ – случай, рассмотренный в предыдущих параграфах. При расстояниях более $r_M > 10$ м видно, что перенапряжения в зависимости от скорости изменения тока молнии $di_M(t)/dt$ могут достигать 500 кВ, приводя к перекрытию изоляции ВЛ 6-35 кВ (см. табл.1.2).

При установке на опоре ВЛ 6-35 кВ троса (рис.1.16,б) площадь контура, образованного фазным проводом и заземленными конструкциями, снизится, скажем с $S = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ м}^2$ до $S = 100 \cdot 3 = 300 \text{ м}^2$. Соответственно, с 500 кВ до 150 кВ уменьшатся максимальные уровни индуктированных перенапряжений, и, например, для ВЛ 35 кВ с ними можно будет не считаться, а для ВЛ 6-10 кВ произойдет заметное повышение грозоупорности, особенно если на линии применены изоляторы с импульсной прочностью 150-200 кВ.

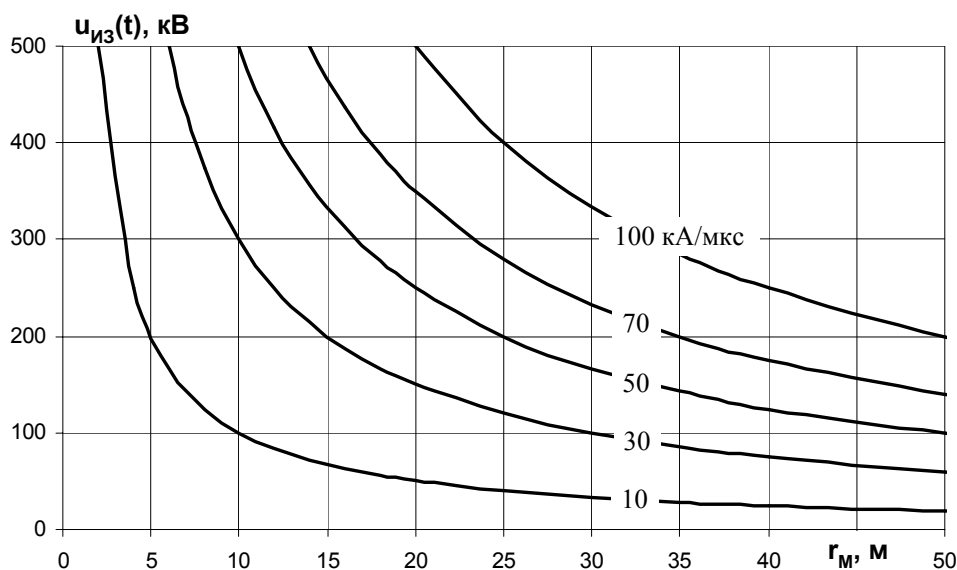


Рис.1.18. Индуктированное напряжение на изоляции ВЛ в зависимости от удаленности места разряда молнии и скорости изменения тока молнии (кА/мкс).

1.5. Общие способы снижения грозových перенапряжений

Традиционные способы снижения грозových перенапряжений на изоляции воздушной линии (повышения грозоупорности ВЛ) предполагают:

- повышение импульсной прочности изоляции ВЛ;
- снижение импульсного сопротивления заземления опор;
- установку молниезащитных тросов как над проводами, так и под ними.

Возможности реализации перечисленных мероприятий неограничены:

- при значительном усилении (удлинении) изоляции ВЛ потребуются изменения конструкции опоры;
- не для всякого грунта можно обеспечить приемлемые сопротивления заземления опор;
- на типовой опоре 35-750 кВ можно повесить 1 или 2 троса, но не более.

Следует четко представлять техническую эффективность различных вариантов повышения грозоупорности ВЛ и стоимость их реализации, чтобы выбрать наиболее оптимальный вариант, отвечающий «высокой надежности за разумные деньги».

Сложившаяся практика такова, что в рамках каждого класса номинального напряжения ВЛ существуют проверенные временем традиционные решения: типовая изоляция, заземляющие устройства, число тросов (0,1,2). Если для конкретной ВЛ не удастся реализовать традиционные решения (они по результатам расчетов и на практике не обеспечивают желаемого уровня грозоупорности), то приходится говорить о дополнительных способах снижения числа грозových отключений – о так называемых нетрадиционных способах, как правило, предполагающих установку на опорах ВЛ специальных защитных устройств того или иного типа, наиболее распространенные среди которых:

- ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) с внешним искровым промежутком и без него;
- длинно-искровые разрядники (РДИ), которые рассмотрены в [22,23].

Разделение мер повышения грозоупорности на традиционные и нетрадиционные весьма условно. Например, все большее число ВЛ оснащается ОПН, т.е. в ближайшие годы такое техническое решение уже можно будет называть типовым, традиционным.

Если для ВЛ известны конкретные участки трассы или опоры, которые вносят заметный вклад в ухудшение грозоупорности ВЛ, делая число отключений линии (реальное или расчетное) вследствие грозových перенапряжений недопустимо большим, то рассматривать различные варианты снижения перенапряжений необходимо именно для таких мест:

- для мест с ослабленной прочностью изоляции (например, железобетонные или стальные опоры на линиях с деревянными);
- для высоких опор (например, при переходах через реки);
- для плохо заземленных опор (например, плохой грунт);
- для участков трассы ВЛ, на которых нет троса;
- для пересечений с ВЛ более высокого класса напряжения.

Если же на ВЛ сложно выделить заведомо «плохие» места, а число отключений линии (реальное или расчетное) вследствие грозových перенапряжений недопустимо велико, то рассматривать различные варианты снижения перенапряжений необходимо одновременно для всей трассы линии. При этом в случае использования на линии специальных аппаратов приходится решать важные вопросы:

- о дальности их действия (о защитной зоне);
- о фазах, в которые их установка наиболее эффективна.

Техническая эффективность традиционных/нетрадиционных способов повышения грозоупорности оценена в 3-й главе на примере подробных компьютерных расчетов для одной из ВЛ 110 кВ. Такие расчеты должны становиться основой для принятия экономически обоснованного решения по защите от перенапряжений каждой ответственной воздушной линии с учетом конкретных особенностей ее трассы.

1.6. Особенности защиты многоцепных опор ВЛ

Для повышения надежности электроснабжения питание потребителей желательно (в ряде случаев обязательно) осуществлять от двух независимых источников, или от двух секций шин, получающих питание от разных ВЛ. На практике же, к сожалению, большое число объектов подключено к разным цепям одной и той же двухцепной линии (рис.1.19).

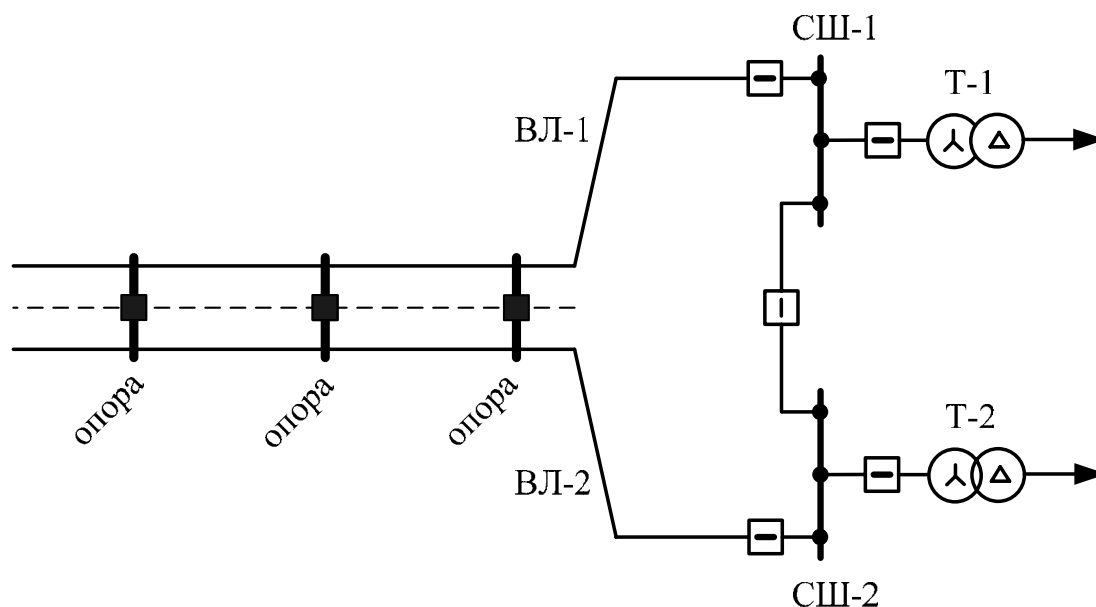


Рис.1.19. Типовая схема электроснабжения по двухцепной воздушной линии.

При разрядах молнии в опоры и тросы двухцепных (многоцепных) линий грозовые перенапряжения воздействуют на изоляцию сразу нескольких цепей (рис.1.20,а) и, следовательно, возможны перекрытия изоляции одноименных фаз, принадлежащих разным цепям, т.е. двухцепные (многоцепные) отключения ВЛ, чреватые серьезными перебоями в электроснабжении потребителей рис.1.19.

В зависимости от величины сопротивления заземления при разрядах молнии в заземленные части ВЛ наибольшим перенапряжениям подвергается изоляция или верхних, или нижних фаз, или крайних фаз (при горизонтальном расположении проводов). Поэтому серьезного снижения вероятности двухцепных отключений ВЛ следует ожидать при оптимизации расположения цепей на опоре так, как это показано на рис.1.20,б. Однако с точки зрения удобства обслуживания линии и безопасности подъема на опору на практике все же используют расположение рис.1.20,а.

Многоцепная опора рис.1.20,в не лишена указанных проблем. При разрядах молнии в такую опору или присоединенный к ней трос вероятны парные перекрытия изоляции цепей одного и того же класса напряжения, но чаще следует ожидать перекрытий изоляции цепей 3 и 4 (поскольку они меньшего класса напряжения, а значит меньшей импульсной прочности).

С точки зрения электроснабжения потребителя важно, чтобы хотя бы одна из двух цепей при грозовых перенапряжениях оставалась в работе. Поэтому в основу защиты изоляции двухцепных ВЛ типа рис.1.20,а целесообразно положить идеологию разделения (дифференцирования) цепей на условно «сильную» и условно «слабую».

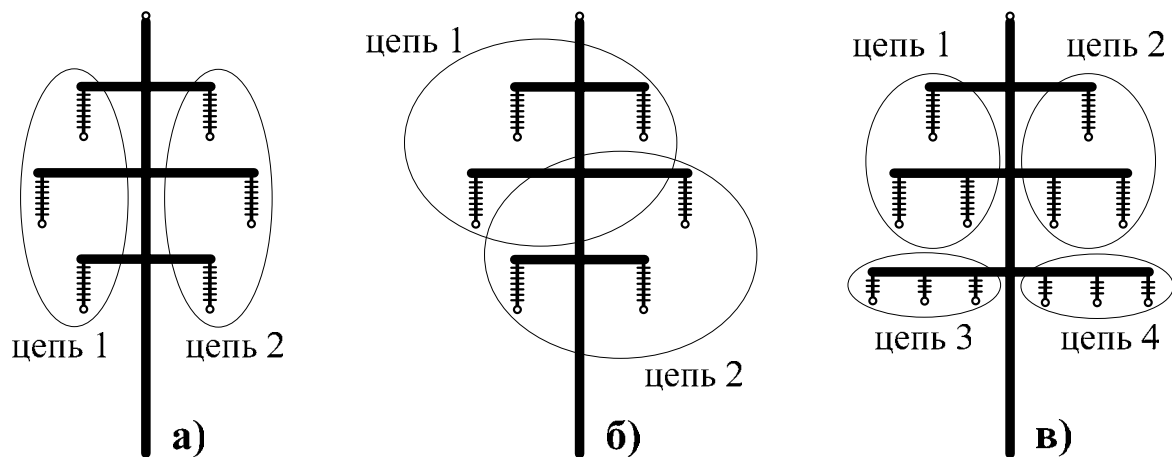


Рис.1.20. Варианты размещения цепей на различных многоцепных опорах.

На рис.1.21,а показана одна из трех траверс стандартной двухцепной воздушной линии (остальные аналогично). После увеличения импульсной прочности фаз 1-й цепи можно сказать, что она стала «сильной» (рис.1.21,б). При разрядах молнии в опору или трос в первую очередь перекроется изоляция «слабой» цепи, что приведет к снижению потенциала опоры, к снижению перенапряжений, воздействующих на изоляцию «сильной» цепи. Если на опоре ВЛ обе цепи, относящиеся к одному и тому же классу напряжения, имеют преднамеренно созданную разницу в импульсной прочности изоляции, то в таких случаях говорят, что изоляция ВЛ «дифференцированная».

Дифференцирование цепей на «сильную» и «слабую» можно выполнить не только за счет изоляции, но и за счет установки в фазы одной из цепей нетрадиционных средств повышения грозоустойчивости (как правило, ОПН).

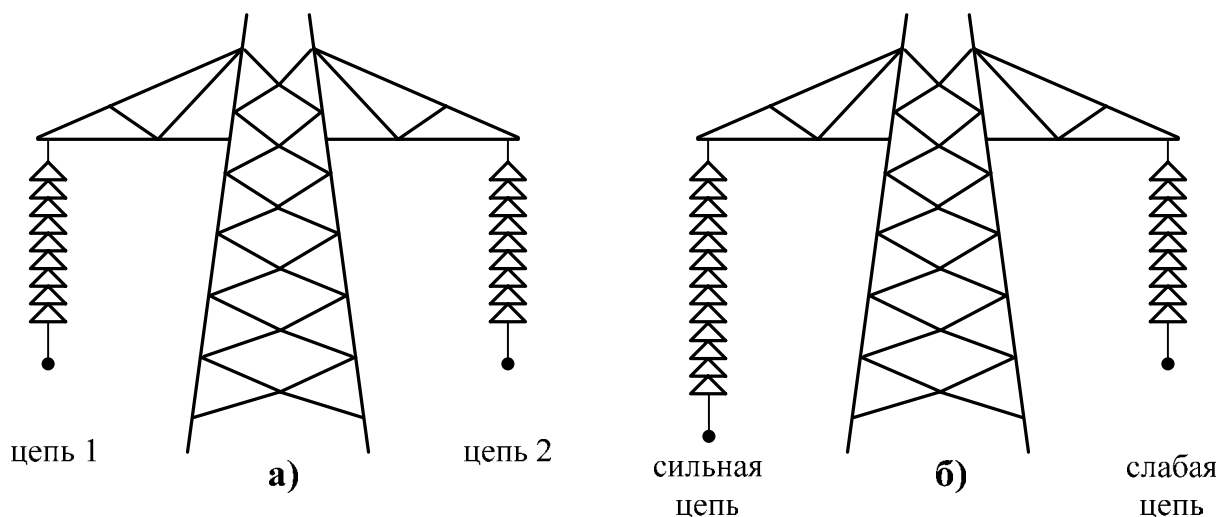


Рис.1.21. Обычная (а) и дифференцированная (б) изоляция двухцепной ВЛ.

1.7. Импульсное сопротивление заземления

При разрядах молнии в опоры и тросы ВЛ импульсный ток стекает по телу опоры в ее заземляющее устройство (рис.1.22), а вероятность перекрытия изоляции линии зависит и от величины сопротивления заземления R_z опоры, и от индуктивности участка опоры $L_{ТРАВ}$. Если для опоры следует учитывать индуктивность, то надо ли учитывать таковую для заземляющего устройства?

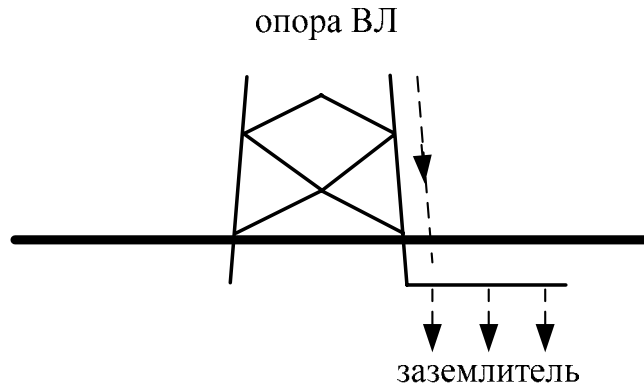


Рис.1.22. Стеkanie тока в заземляющее устройство опоры.

По данным [24,25] теоретические и экспериментальные исследования указывают на возможность моделирования электромагнитных и волновых процессов в заземлителе при помощи теории длинных линий с потерями. Здесь под заземлителем, как правило, понимается горизонтальный заземляющий проводник (шина), расположенный в земле параллельно ее поверхности. По теории [26] в расчетах допустимо замещать длинные линии при помощи последовательного соединения нескольких П-схем замещения, каждая из которых имеет вид рис.1.23,а. Для простоты ограничимся одной П-схемой, где R и L – продольные активное сопротивление и индуктивность шины, G и C – поперечные проводимость и емкость между шиной и окружающим грунтом.

Все четыре величины зависят от длины шины, ее радиальных размеров. Кроме того: R и G зависят, соответственно, от удельных сопротивлений шины и грунта; L и C зависят, соответственно, от магнитной и диэлектрической проницаемостей грунта; все величины кроме R зависят от глубины залегания шины относительно поверхности земли.

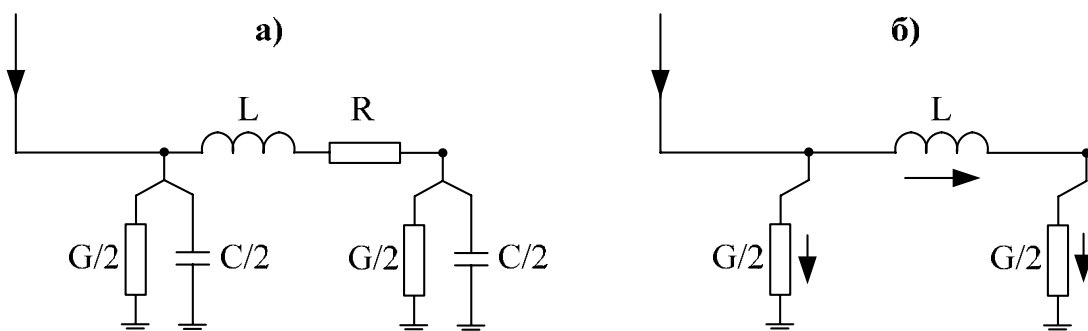


Рис.1.23. П-схема замещения заземляющего устройства (а) и ее упрощение (б).

Можно показать, что при типовых материалах шин и характеристиках грунта в задачах расчета процессов в заземляющем устройстве допустимо не учитывать R и C . Тогда в упрощенной схеме рис.1.23,б ток может попасть в грунт лишь через элементы $G/2$, однако его проникновению в удаленный от опоры ВЛ элемент $G/2$ будет препятствовать индуктивность L , падение напряжения на которой $L \cdot di(t)/dt$:

- при высокой скорости $di(t)/dt$ изменения тока можно считать, что в удаленные от опоры части заземляющего устройства ток не попадает и, поэтому, сопротивление заземления опоры будет $R_3 = \frac{1}{G/2} = \frac{2}{G}$;
- при малой скорости $di(t)/dt$ изменения тока нет особых препятствий для его проникновения в удаленные части заземляющего устройства и, поэтому, сопротивление заземления опоры будет $R_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{G/2} = \frac{1}{G}$, т.е. в 2 раза меньше.

Простейшими выкладками показано, что для заземляющего устройства «обычное» сопротивление (сопротивление растекания) и «импульсное» сопротивление могут существенно отличаться – за счет индуктивности импульсное сопротивление оказывается больше. Следовательно, при расчете грозовых перенапряжений желательно учитывать не только сопротивление растекания, но и индуктивность заземляющего устройства

Еще один механизм, обеспечивающий различие сопротивлений заземления, следующий: при значительных токах, стекающих с опоры, вблизи от заземлителя под действием высокой напряженности электрического поля могут происходить пробой грунта, что «увеличивает» радиальные размеры заземляющих шин, снижая результирующее сопротивление заземления. Для учета ионизационных процессов в грунте известна эмпирическая формула [18]

$$R_3(i) = \frac{R_0}{\left(1 + \frac{i}{I_3}\right)^{0.5}},$$

где $I_3 = E_3 \frac{\rho_3}{2\pi R_0^2}$; R_0 – сопротивление заземляющего устройства постоянному току; ρ_3 – удельное сопротивление грунта ($Ом \cdot м$), E_3 – критическая напряженность начала искрообразования в грунте ($В/м$). Для некоторых типов грунта значения ρ_3 и E_3 можно найти в [2].

Итак, импульсное сопротивление заземления может быть как больше, так и меньше «обычного» сопротивления заземления. Однако в дальнейшем, для удобства, не будем детализировать процессы в заземляющем устройстве, а будем считать, что оно обладает импульсным сопротивлением заземления R_3 , в котором заключены и растекание G и индуктивность L .

2. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ

Для обеспечения надежности электроснабжения потребителей в условиях недостаточной грозоупорности воздушных линий есть два основных пути:

- применять на уже построенных линиях «традиционные» и «нетрадиционные» средства повышения грозоупорности;
- развивать системы электроснабжения, т.е. строить дополнительные линии.

На стадии проектирования ВЛ расчетное число отключений из-за грозовых перенапряжений снижают традиционными способами – уменьшая импульсное сопротивление заземления опор, применяя молниезащитные (грозозащитные) тросы, снижая высоту опор (применение железобетонных опор вместо металлических), увеличивая импульсную прочность линейной изоляции.

В ряде случаев традиционные способы повышения грозоупорности ВЛ оказываются неэффективными из-за неблагоприятных геофизических условий (высокое удельное сопротивление грунтов) или метеоусловий (высокие гололедно-ветровые нагрузки для тросов). Или, например, грозоупорность ВЛ, на которой в полной мере реализованы традиционные способы, хотя и является высокой с точки зрения типовых линий рассматриваемого класса напряжения, однако все же не устраивает конкретного потребителя. В подобных ситуациях приходится говорить об использовании нетрадиционных способов повышения грозоупорности ВЛ, призванных дополнить собой традиционные.

Наиболее часто упоминаемым нетрадиционным способом повышения грозоупорности ВЛ всех классов номинального напряжения называется использование ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН), как эффективного средства снижения числа отключений ВЛ, вызванных грозовыми перенапряжениями. Повышение грозоупорности ВЛ при помощи установки на опорах так называемых «подвесных» ОПН подтверждается научными исследованиями и опытом эксплуатации.

2.1. Конструкция и принцип действия ОПН

Для защиты оборудования распределительных устройств от грозовых и коммутационных перенапряжений традиционно использовались вентильные разрядники (РВ). Конструкция разрядников предполагала наличие нелинейных сопротивлений и последовательно включенного искрового промежутка, необходимого для исключения длительного воздействия на сопротивления рабочего напряжения сети.

После того, как технология производства нелинейных элементов вышла на новый уровень, оказалось возможным допускать длительное воздействие на сопротивления рабочего напряжения сети без ухудшения их защитных свойств. Одновременное использование новых высоконелинейных сопротивлений и отказ за ненадобностью от искровых промежутков – вот основные особенности современных защитных аппаратов от грозовых и коммутационных перенапряжений, получивших название ОПН.

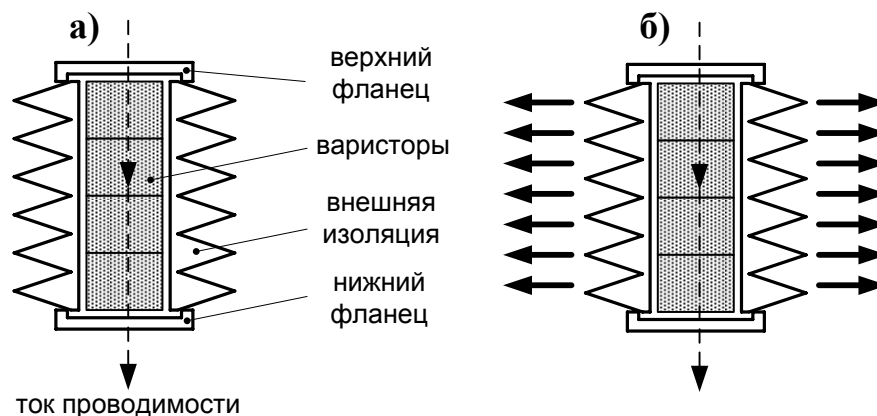


Рис.2.1. Основные части конструкции ОПН и принцип его работы.

Важнейшими частями конструкции ОПН являются показанные на рис.2.1,а нелинейные элементы (варисторы), внешняя изоляция, верхний и нижний фланцы.

Принцип работы ОПН построен на резко нелинейной вольтамперной характеристике варисторов, т.е. нелинейной зависимости тока от напряжения. В нормальном режиме при воздействии на ОПН фазного рабочего напряжения сети в варисторах проходит ток проводимости, величина которого составляет доли миллиампера. При возникновении перенапряжений ток в варисторах резко возрастает, а энергия перенапряжений в виде тепла рассеивается в ОПН и в цепи его заземления. Следовательно, для успешной безаварийной работы ОПН необходимо, чтобы отвод тепла через его боковую поверхность (рис.2.1,б) был интенсивнее процесса выделения тепла в варисторах.

Интервалы времени между следующими друг за другом грозowymi и/или коммутационными перенапряжениями, как правило, вполне достаточны для остывания ОПН и его перехода в начальное состояние, когда температура варисторов равна или чуть больше температуры окружающей среды. Напротив, квазистационарные перенапряжения могут приводить к многократным срабатываниям ОПН в течение малого интервала времени, недостаточного для остывания варисторов. Именно поэтому говорят, что ОПН предназначены для защиты изоляции от грозowych и коммутационных перенапряжений, но не предназначены для защиты от квазистационарных.

Если при изготовлении вентиляных разрядников РВ в качестве внешней изоляции использовался фарфор, то ОПН пришли в энергетику вместе с полимерной изоляцией. На достоинства полимерной изоляции в эксплуатации уже неоднократно указывалось: среди них высокая гидрофобность (как следствие – низкая вероятность перекрытия по поверхности изоляции в увлажненном состоянии), взрывобезопасность, вандалоустойчивость, малый вес, способность работать в условиях естественных и промышленных загрязнений, широкий диапазон рабочих температур и т.п.

Отсутствие в конструкции ОПН искровых промежутков и использование полимерной изоляции позволили максимально упростить и удешевить

конструкцию ОПН, сделать ее взрывобезопасной, что обусловило широкое применение ОПН в энергетике.

Большие габариты и вес не давали возможности массово устанавливать РВ на воздушных линиях, тогда как легкая и компактная конструкция современных ОПН с полимерной изоляцией сделала их очень привлекательным для защиты изоляции ВЛ. Дополнительным толчком к «популяризации» технического решения по установке ОПН на ВЛ стали следующие, увы ошибочные, предположения:

- для надежной защиты изоляции ВЛ достаточно разместить вдоль ее трассы ограниченное число ОПН, т.е. защитная зона ОПН составляет многие сотни метров;
- для надежной работы ОПН, установленных на ВЛ, достаточно применять ОПН, рассчитанные на меньшие токи по сравнению с ОПН в распределительных устройствах, т.е. ОПН для линии может быть заметно легче и дешевле аналога для РУ.

На самом деле для защиты ВЛ требуемое число ОПН может быть сопоставимо с числом опор линии, а токовые и энергетические характеристики подвесных ОПН должны быть не хуже, чем у подстанционных аппаратов. Несмотря на это ОПН уже находят и будут все больше находить применение на воздушных линиях, поскольку в ряде случаев альтернативы им нет.

2.2. ОПН и внешние (грозовые) перенапряжения на ВЛ

2.2.1. Места установки ОПН вдоль трассы ВЛ

Если для конкретной ВЛ сложно выявить неблагоприятные с точки зрения грозových перекрытий изоляции участки трассы, конкретные неблагоприятные места и опоры вдоль трассы ВЛ, то тогда речь может идти о защите от грозových перенапряжений всех участков линии. В таком случае следует определиться с тем, а как часто вдоль трассы ВЛ надо устанавливать ОПН: на каждой опоре (рис.2.2,а), через опору (рис.2.2,б), через две опоры и проч. Иначе говоря, надо иметь представление о защитной зоне ОПН.

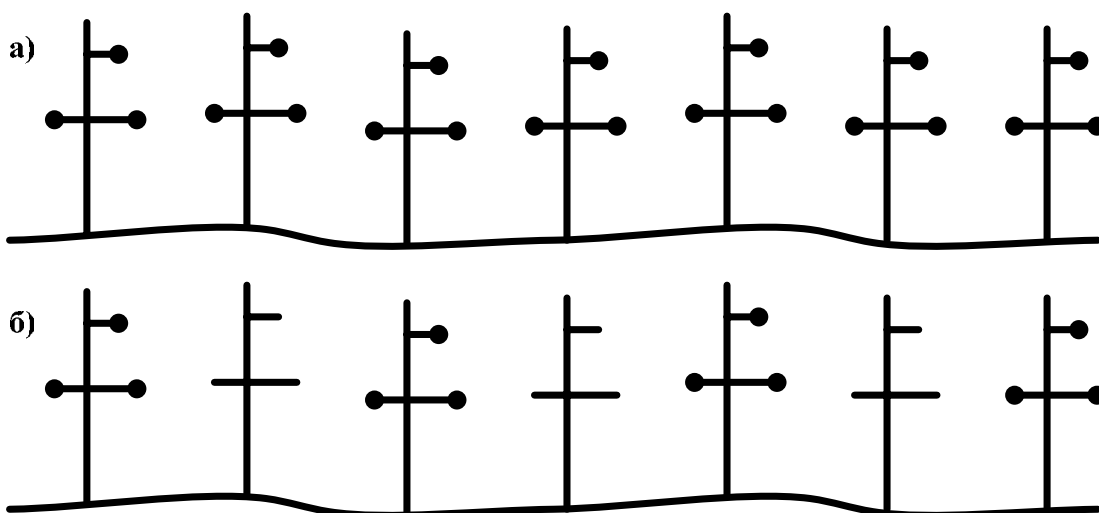


Рис.2.2. Размещение ОПН вдоль всей трассы ВЛ: (а) – на каждой опоре, (б) – через опору.

При установке ОПН в распределительном устройстве не допускают, чтобы расстояние по ошиновке от ОПН до защищаемого силового трансформатора превышало несколько десятков метров [27]. Таким образом, защитная зона ОПН в распределительном устройстве составляет всего лишь десятки метров и поэтому не следует ожидать, что при установке ОПН на опоре ВЛ он сможет защищать изоляцию сразу многих опор, удаленных от ОПН на сотни метров. Безусловно, пробой изоляции трансформатора и перекрытие линейной изоляции ВЛ – это принципиально разные события с точки зрения экономического ущерба. Кроме того, в рамках заданного класса напряжения разрядное напряжение изоляции ВЛ примерно в 1.5 раза выше, чем допустимое напряжение для внутренней изоляции оборудования [28]. Тем не менее, защитной зоной ОПН на ВЛ можно считать лишь несколько сотен метров и никак не более. Поэтому, говоря о защите изоляции ВЛ вдоль всей ее длины, следует понимать, что ОПН придется ставить не реже, чем каждые 200-300 м:

- для ВЛ 6-10 кВ (типовой пролет 60 м) не реже, чем через 2-3 опоры;
- для ВЛ 35-750 кВ на каждой опоре.

Когда речь идет о локальных неблагоприятных с точки зрения грозových перенапряжений участках трассы ВЛ или конкретных опорах, установка ОПН, разумеется, целесообразна только на них:

- на часто поражаемых молнией опорах (рис.2.3,а и рис.2.3,б);

- на высоких опорах с повышенной индуктивностью (рис.2.3,б);
- на опорах с повышенным сопротивлением заземления (рис.2.3,в);
- в других случаях.

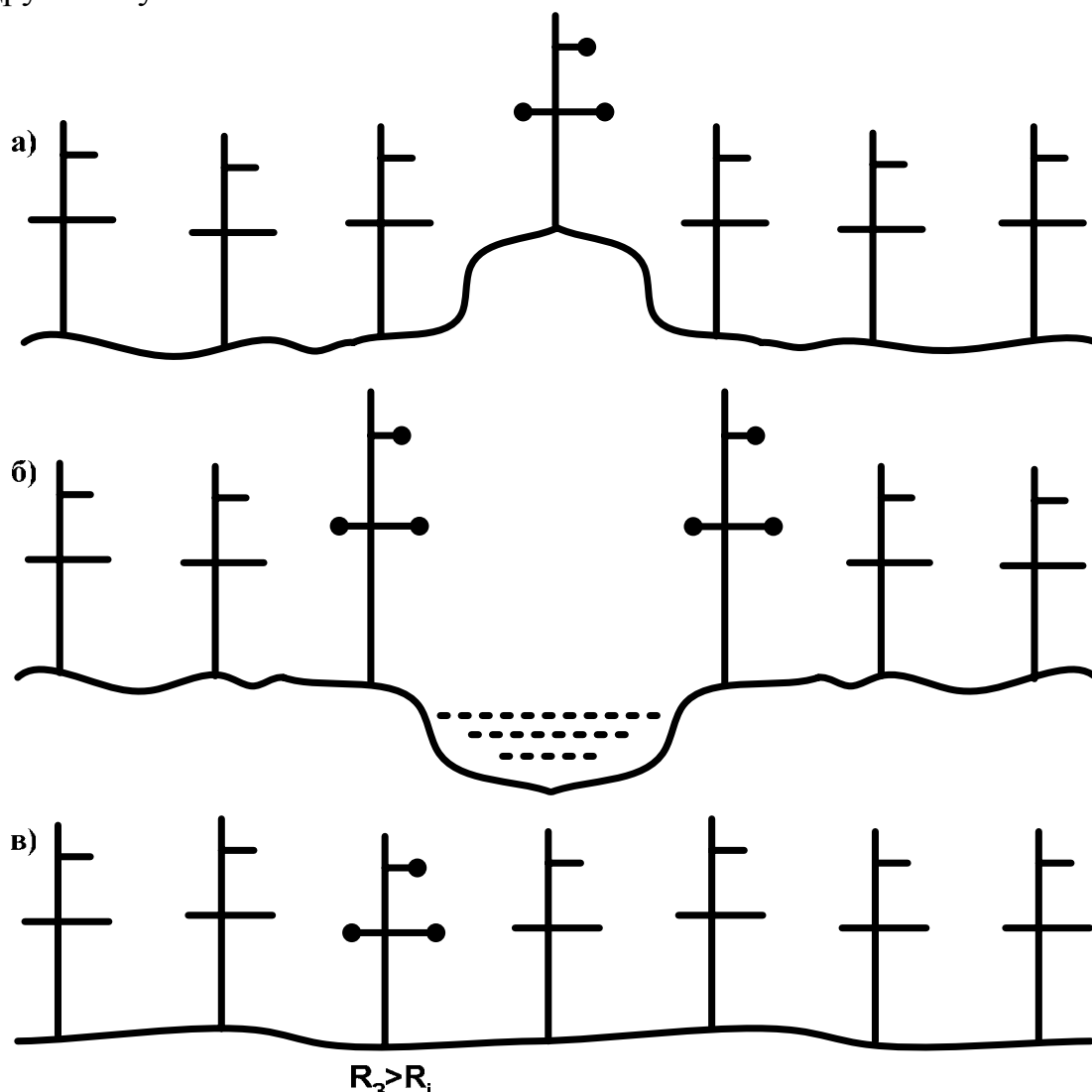


Рис.2.3. Размещение ОПН на проблемных опорах: (а) – на часто поражаемых опорах, (б) – на опорах с повышенной индуктивностью, (в) – на опорах с повышенным сопротивлением заземления.

2.2.2. Места установки ОПН на одноцепных опорах

В табл.2.1-2.2 даны различные варианты размещения ОПН на одноцепной опоре ВЛ, отличающиеся количеством требуемых аппаратов и эффективностью снижения числа грозových перекрываний изоляции линии.

При разрядах молнии грозových перенапряжения на изоляции разных фаз могут быть различны, а первоочередная установка ОПН предпочтительна в те фазы, изоляция которых подвергается наибольшему воздействию. Такие фазы были выявлены ранее (в первой главе) при упрощенном анализе механизмов возникновения перенапряжений и послужили основой для формулирования общих рекомендаций по размещению ОПН на одноцепных опорах, которые приведены в табл.2.3 для треугольного расположения проводов и в табл.2.4 для горизонтального расположения проводов.

Табл.2.1. Защита одноцепных ВЛ с треугольным расположением проводов.

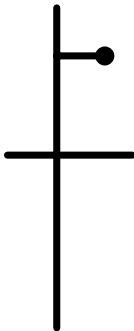
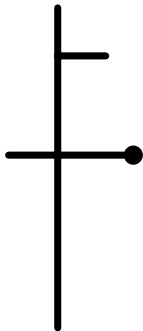
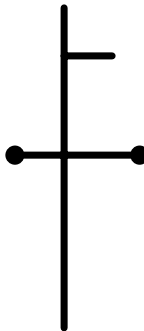
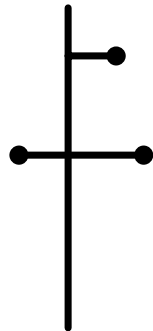
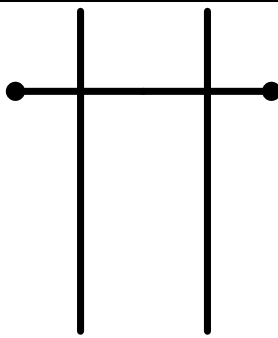
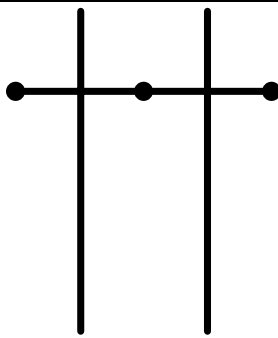
расположение ОПН на опоре	в верхней фазе	в нижней фазе (под верхней)	в нижних фазах	во всех фазах
схема				
число ОПН на опоре	1	1	2	3

Табл.2.2. Защита одноцепных ВЛ с горизонтальным расположением проводов.

расположение ОПН на опоре	в крайних фазах	во всех фазах
схема		
число ОПН на опоре	2	3

В каждом конкретном случае оптимальный вариант защиты ВЛ должен быть доказан технико-экономическими расчетами, в которых, в частности, необходимо определить, а какие из 4-х указанных в табл.2.3-2.4 расчетных случаев являются основными виновниками отключений ВЛ.

Для треугольного расположения проводов обоснованием обобщенных рекомендаций табл.2.3 служат следующие положения:

- разряды молнии в провода наиболее вероятны для верхних фаз и, поэтому, именно в них оправдана установка ОПН для защиты от перенапряжений, вызванных прямыми разрядами молнии;
- при разрядах молнии в опоры линии без троса, вне зависимости от сопротивления заземления опор, наибольшие перенапряжения возникают на верхних фазах, и именно они в первую очередь требуют защиты;
- при разрядах молнии в тросы указать фазы, которые перекрываются чаще других, без проведения расчетов достаточно сложно, однако известно, что при малых сопротивлениях заземления чаще перекрываются верхние фазы, а при повышенных сопротивлениях заземления – нижние фазы;

- индуктированным перенапряжениям подвергается изоляция всех трех фаз одноцепной опоры, и, следовательно, при защите от них установка ОПН требуется одновременно во все три фазы.

Для горизонтального расположения проводов обоснованием обобщенных рекомендаций табл.2.4 служат следующие положения:

- при наличии тросов разряды молнии вероятны в крайние фазы, а при отсутствии троса – в любые фазы;
- все три фазных провода имеют одинаковую высоту подвеса и равную индуктивность участка опоры от траверсы до земли – поэтому при разрядах молнии в опору линии без троса не представляется возможным указать фазу, изоляция которой перекрывается чаще других;
- при наличии тросов наибольший коэффициент связи с тросами имеет место для средней фазы (у нее «два троса», а у крайних только «один трос») – поэтому при разрядах молнии в трос наиболее часто будут перекрываться крайние фазы.

Табл.2.3. Грозовые перенапряжения на изоляции одноцепной ВЛ с треугольным расположением проводов и рекомендации по местам первоочередной установки ОПН.

Номер расчетного случая	Место разряда молнии	Место первоочередной установки ОПН	
		Верхние фазы	Нижние фазы
1	в фазный провод	+	
2	в опору линии без троса	+	
3	в трос (вблизи или на удалении от опоры)	+(малые R_3)	+(большие R_3)
4	рядом с ВЛ	+	+

Табл.2.4. Грозовые перенапряжения на изоляции одноцепной ВЛ с горизонтальным расположением проводов и рекомендации по местам первоочередной установки ОПН.

Номер расчетного случая	Место разряда молнии	Место первоочередной установки ОПН	
		Крайние фазы	Средние фазы
1	в фазный провод линии без троса	+	+
	в фазный провод линии с тросом	+	
2	в опору линии без троса	+	+
3	в трос (вблизи или на удалении от опоры)	+	
4	рядом с ВЛ	+	+

2.2.3. Места установки ОПН на многоцепных опорах

При разрядах молнии в опоры и тросы многоцепной ВЛ возможно перекрытие изоляции одновременно нескольких цепей, что нежелательно для потребителя, особенно если рассматриваемая ВЛ является единственным источником питания. Эффективная защита от перенапряжений подобных многоцепных (двухцепных) ВЛ может быть построена с использованием принципа разделения («дифференцирования») цепей на условно «сильную» и условно «слабую».

Значительное усиление изоляции одной из цепей достигается установкой в ее фазы ограничителей перенапряжений ОПН – различные варианты их размещения показаны в табл.2.5. Общие рекомендации по использованию того или иного варианта расстановки ОПН аналогичны одноцепным ВЛ (табл.2.3).

Табл.2.5. Защита двухцепных ВЛ с горизонтальным расположением проводов (защита только одной цепи).

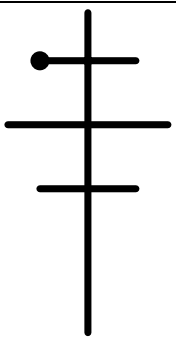
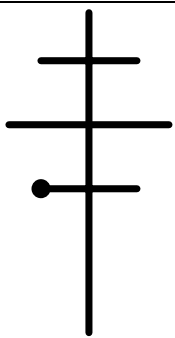
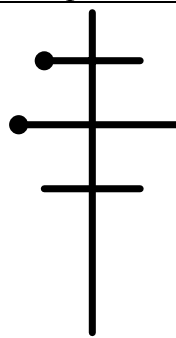
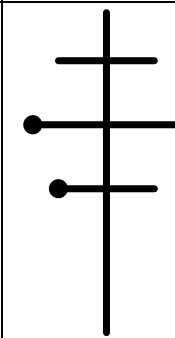
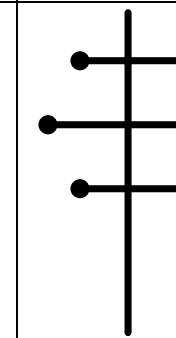
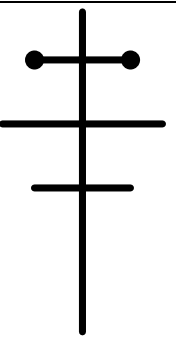
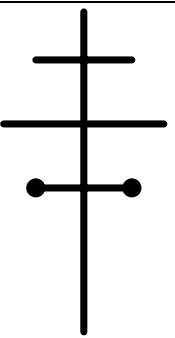
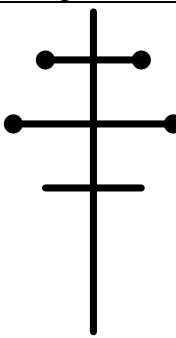
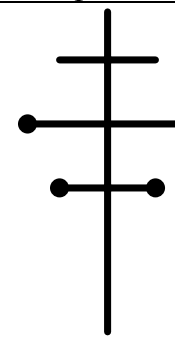
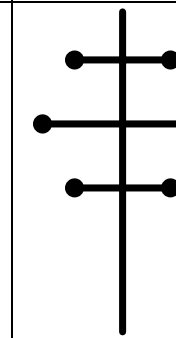
расположение ОПН на опоре	в верхней фазе	в нижней фазе	в верхней и средней фазах	в средней и нижней фазах	во всех фазах
схема					
число ОПН на опоре	1	1	2	2	3

Табл.2.6. Защита двухцепных ВЛ с горизонтальным расположением проводов (защита обеих цепей).

расположение ОПН на опоре	в верхних фазах	в нижних фазах	в верхних и средних фазах	в средних и нижних фазах	во всех фазах
схема					
число ОПН на опоре	2	2	4	4	6

В тех случаях, когда нежелательны не только многоцепные, но даже одноцепные отключения, для обеспечения защиты изоляции от грозových перенапряжений потребуется установка ОПН в фазы всех защищаемых цепей, как это показано в табл.2.6. Общие рекомендации по использованию того или иного варианта расстановки ОПН аналогичны одноцепным ВЛ (табл.2.3).

2.2.4. ОПН как альтернатива традиционным средствам защиты ВЛ

Основными традиционными средствами повышения грозоупорности ВЛ являются усиление изоляции, улучшение заземления опор, установка на опорах молниезащитных тросов. В рамках заданного класса напряжения сети (класса изоляции ВЛ) из перечисленных средств остаются заземление и тросовая защита. Необходимость в нетрадиционных средствах возникает тогда, когда исчерпаны традиционные возможности, или их реализация технически неэффективна и экономически нецелесообразна.

Для воздушных линий 6-10 кВ в силу недостаточной прочности изоляции традиционные средства повышения грозоупорности (трос, заземление) оказываются малоэффективными и не применяются, а установка ОПН на опорах в ряде случаев оказывается единственным действенным решением.

Для воздушных линий 35-750 кВ, если заземление и тросовая защита выполнены должным образом, в большинстве случаев нет необходимости в массовой установке ОПН вдоль всей трассы ВЛ, а оправданной оказывается лишь защита нескольких «слабых» опор (пересечения с ВЛ более высокого класса напряжения, переходы через реки, др. места). Ощутимая потребность в ОПН на ВЛ 35-750 кВ появляется тогда, когда в силу различных причин традиционные средства не реализованы в полной мере:

- на части трассы или на всем ее протяжении отсутствует тросовая защита;
- не обеспечены достаточно малые сопротивления заземления опор.

Как ни странно, следует ожидать, что открывшаяся в последние годы возможность эффективно защищать изоляцию ВЛ 35-750 кВ от грозových перенапряжений с помощью современных ОПН приведет к ухудшению качества строительства воздушных линий, к укоренению несколько небрежного отношения к традиционным, проверенным годами, средствам обеспечения достаточной грозоупорности ВЛ 35-750 кВ: зачем рыть землю под опорой или менять старый трос на новый, когда можно просто установить ОПН? Вместе с тем, экономические расчеты показывают, что защита всей трассы ВЛ с помощью ОПН, например, обойдется дороже установки (замена на новый) традиционного молниезащитного троса. Учитывая изложенное, при строительстве или реконструкции ВЛ 35-750 кВ массовую установку ОПН на опорах следует рассматривать лишь как дополнительное средство повышения грозоупорности, необходимость в котором должна быть тщательно технически и экономически обоснована.

Так, в настоящее время в отечественных сетях 110-220 кВ все чаще говорят об отказе от установки (от замены) молниезащитных тросов, функции которых по снижению грозových перенапряжений предлагают возложить на

ОПН, массово разместив их на опорах вдоль трассы ВЛ. Не затрагивая экономические аспекты, кратко остановимся на технической стороне вопроса.

Изначально ограничители перенапряжений ОПН были предназначены для защиты от перенапряжений оборудования распределительных устройств (РУ), где сменили предыдущее поколение защитных аппаратов – вентильных разрядников. Особенность распределительного устройства заключается в том, что на его территории маловероятен разряд молнии в токоведущую часть электроустановки – это достигается размещением на территории РУ мощной системы молниеотводов. Грозовые перенапряжения, воздействующие на изоляцию оборудования, вызываются грозовыми волнами, приходящими с присоединенных к РУ воздушных линий, где они образуются вследствие разрядов молнии в ВЛ или рядом с ней. Таким образом, установленные в распределительном устройстве ОПН рассеивают энергию грозовых волн, уже ослабленных перекрытиями изоляции ВЛ, импульсной короной и потерями.

Воздушные линии имеют собственную систему защиты от прямых разрядов молнии в токоведущие части (фазные провода) – традиционный молниезащитный трос:

- эффективность троса такова, что в ряде случаев вероятность разряда молнии в фазный провод по трассе ВЛ оказывается больше, чем на территории распределительного устройства, защищенного молниеотводами;
- протяженность ВЛ существенно больше габаритов РУ;
- число ОПН на ВЛ может быть существенно больше, чем в РУ.

Изложенное показывает, что если на ВЛ для защиты ее изоляции от грозовых перенапряжений установлено большое число ОПН, то необходимо считаться с возможностью прямого разряда молнии в фазные провода вблизи от какого-то из ОПН. При отсутствии на ВЛ молниезащитного троса такая возможность становится более чем реальной. Вместе с тем ОПН, хорошо зарекомендовавший себя в распределительном устройстве, может быть не рассчитан на столь мощное воздействие, каким является прямой разряд молнии. Оценим степень опасности прямого разряда молнии.

Допустимость для ОПН того или иного воздействия можно определить путем его сопоставления с испытательным. При работе ОПН в его варисторах в виде тепла выделяется энергия

$$W = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt ,$$

где $i(t)$ – ток в варисторах, $u(t)$ – вызванное этим током падение напряжения на варисторах, которое пропорционально числу последовательно включенных варисторов, а значит классу напряжения ОПН.

Чтобы не учитывать конкретный класс напряжения, а провести наиболее общие рассуждения одновременно для ОПН 6-750 кВ, удобно рассматривать не энергию в варисторах ОПН, а проходящий через них электрический заряд

$$q = \int_0^t i(t) \cdot dt .$$

Способность ОПН рассеивать энергию или пропускать импульсы тока (заряд) проверяется при так называемых рабочих испытаниях, когда в нем одновременно с воздействием напряжения 50 Гц пропускают $N = 2$ импульсных тока прямоугольной формы длительностью $T_{II} = 2000$ мкс, величина которых зависит от диаметра варисторов и лежит в диапазоне $I_{II} = 300 \div 2000$ А.

Для ОПН с варисторами среднего диаметра справедливо $I_{II} = 1000$ А и тогда допустимый заряд составит

$$q = N \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt = N \cdot I_{II} \cdot T_{II} = 2 \cdot 1000 \cdot (2000 \cdot 10^{-6}) = 4 \text{ Кл.}$$

При разрядах молнии в опоры и тросы основная часть тока молнии стекает по телу опоры в ее заземляющее устройство, не вызывая заметных токов в установленных на линии ОПН (за исключением повышенных R_3).

При разрядах молнии в фазные провода в ОПН протекают токи, сопоставимые с током молнии – именно этот случай является одним из самых опасных с точки зрения риска перегрева и повреждения ОПН.

Статистические данные [1,2] свидетельствуют о том, что вне зависимости от класса напряжения ВЛ при разрядах молнии импульсные токи, проходящие в канале молнии, переносят к земле заряд q от единиц до десятков Кл, тогда как средний ОПН рассчитан лишь на единицы Кл. Следовательно, при разрядах молнии в фазный провода, изоляция которых защищена ОПН, возможен нерасчетный разогрев и последующее повреждение ОПН, вполне реальное для линий, не имеющих тросовой защиты.

Допустимость применения ОПН и выбор их характеристик должны быть тщательным образом обоснованы. Это особенно важно для ВЛ, не имеющих молниезащитного троса, когда при неверном выборе мест установки и характеристик ОПН число отключений ВЛ, связанных с повреждениями таких ОПН, может стать едва ли не больше, чем у незащищенной линии.

При разрядах молнии наибольшие перенапряжения и риск перекрытий изоляции согласно (1.1)-(1.4) существуют при больших мгновенных значениях тока $i_M(t)$ и скорости его изменения $di_M(t)/dt$, т.е. вблизи от максимального значения импульса и его фронта. Поэтому, учитывая конечную скорость распространения волн вдоль линии, повлиять на уровень перенапряжений и защитить изоляцию ВЛ успевают лишь те ОПН, которые находятся на ближайшей опоре. Что касается заряда молнии, то он определяется не фронтом импульса тока, а его длительностью, которая заметно больше и, следовательно, многие ОПН, установленные на ВЛ, успеют поучаствовать в рассеивании энергии перенапряжений, в пропускании заряда тока молнии. Отсюда следует, что при учете взаимной помощи аппаратов друг другу риск повреждения ОПН будет меньше, чем это могло показаться после сопоставления заряда мощной молнии с зарядом, допустимым для единственного установленного ОПН.

2.3. ОПН и внутренние перенапряжения на ВЛ

Среди всех отключений ВЛ из-за перенапряжений доминирующей причиной являются лишь грозовые. В случае размещения ОПН на опорах воздушной линии для защиты ее изоляции от грозовых перенапряжений опасность перенапряжений будет снижена. Вместе с тем, установленные ОПН будут подвергаться не только грозовым, но и других видам перенапряжений: коммутационным и квазистационарным. Являются ли эти факторы важными, требующими учета при выборе ОПН и оценки надежности его работы?

2.3.1. Коммутационные перенапряжения

Считается, что коммутационные перенапряжения приводят к выделению в ОПН энергий даже больших, чем при грозовых перенапряжениях. Это видно, например, при анализе методик [29] испытаний варисторов, проводимых для вновь разрабатываемых конструкций и типов ОПН: способность варисторов рассеивать энергию перенапряжений проверяется на импульсах тока прямоугольной формы длительностью $T_{II} = 2000$ мкс при величине токов I_{II} в несколько сотен ампер. С точки зрения величины тока подобные воздействия действительно похожи на токи в ОПН при ограничении коммутационных перенапряжений, хотя столь большая длительность тока в ОПН возможна лишь при коммутациях воздушных линий длиной более 500 км. Однако и по величине, и по длительности подобные испытательные воздействия имеют очень мало общего с эксплуатационными воздействиями на ОПН при грозовых перенапряжениях.

В испытаниях проверка варисторов на работоспособность при грозовых перенапряжениях выполняется лишь с точки зрения их способности пропускать без повреждения большие по величине токи в несколько десятков кА. Одна из главных целей таких импульсных воздействий – проверить отсутствие перекрытий варисторов по поверхности, но, поскольку длительность таких испытательных токов составляет единицы микросекунд, то они не являются основанием для оценки способности ОПН поглощать энергию грозовых перенапряжений.

На самом деле, вопреки мнению, отраженному в методиках испытаний, в эксплуатации в подавляющем большинстве случаев именно грозовые перенапряжения, а не коммутационные, предъявляют главные требования к способности ОПН рассеивать энергию перенапряжений. Покажем это, опираясь на простейшие оценки и здравый смысл.

Допустимо считать, что при включениях и отключениях ВЛ энергия коммутационных перенапряжений, имеющих максимальное значение $U_{МАКС}$, запасается в емкости коммутируемой линии [30]:

$$W = \frac{CU_{МАКС}^2}{2},$$

где $C = C^*l$ – емкость линии, определяемая через ее длину l и погонную C^* .

Перенапряжения удобно характеризовать кратностью – степенью превышения перенапряжениями амплитуды фазного значения наибольшего

рабочего напряжения сети $K = U_{\text{МАКС}} / (\sqrt{2} \cdot U_{\text{НР}} / \sqrt{3})$, где $U_{\text{НР}}$ – наибольшее рабочее напряжение сети (линейное значение). Тогда

$$W = \frac{C^* \cdot l \cdot (K \cdot \sqrt{2/3} \cdot U_{\text{НР}})^2}{2}.$$

Для сопоставления ОПН различных классов напряжения энергию лучше оценивать в относительных единицах наибольшего рабочего напряжения ОПН:

$$W_{\text{уд}} = \frac{W}{U_{\text{НРО}}},$$

где $W_{\text{уд}}$ – удельная рассеиваемая энергия, которая по своей сути и размерности (Кл) соответствует прошедшему через ОПН заряду. Окончательное выражение:

$$W_{\text{уд}} = \frac{C^* \cdot l \cdot K^2 \cdot U_{\text{НР}}}{3} \cdot \frac{U_{\text{НР}}}{U_{\text{НРО}}}, \quad (2.1)$$

где от класса напряжения практически не зависят: кратность K , соотношение $U_{\text{НР}} / U_{\text{НРО}}$ (изолированная нейтраль $U_{\text{НР}} / U_{\text{НРО}} \approx 1$, заземленная $U_{\text{НР}} / U_{\text{НРО}} \approx \sqrt{3}$).

Из выражения (2.1) видно, что удельная энергия (заряд) коммутационных перенапряжений пропорциональна классу напряжения $U_{\text{НР}}$ и длине линии l . На самом деле рост $W_{\text{уд}}$ происходит несколько быстрее $U_{\text{НР}}$, поскольку имеется слабая зависимость емкости C^* от класса напряжения (число составляющих в фазном проводе и их радиус, как правило, возрастают с ростом $U_{\text{НР}}$).

Согласно (2.1), задавшись определенной длиной линии l , можно, в частности, показать, что в сети 750 кВ ($U_{\text{НР}} = 787$ кВ) коммутационные перенапряжения обладают удельной энергией, которая более чем в 100 раз выше, чем для сети 6 кВ ($U_{\text{НР}} = 7.2$ кВ).

Средняя длина ВЛ 750 кВ на порядок превосходит таковую для ВЛ 6 кВ. Следовательно, если бы коммутационные перенапряжения действительно были определяющими при выборе ОПН, то в сетях 6 кВ и в сетях 750 кВ требовались бы ОПН с удельными энергиями, отличающимися на три порядка. Обеспечить подобное различие затруднительно, поскольку удельная энергия (заряд) пропорциональна площади поперечного сечения варисторов.

Действительно, в настоящее время промышленность выпускает ОПН 6-750 кВ с варисторами такого диаметра, что удельная энергия каждого импульса изменяется в достаточно узком диапазоне $W_{\text{уд}} = 1.5 \div 10.0$ кДж/кВ, соответствующем диапазону значений прямоугольных токов $I_{\text{п}} \approx 300 \div 2000$ А. Опыт эксплуатации показывает, что такие ОПН благополучно выдерживают воздействия при коммутационных перенапряжениях даже в сетях 330-750 кВ. Следовательно, если для ОПН 330-750 кВ при выборе $W_{\text{уд}}$ и надо учитывать энергию коммутационных перенапряжений, то для ОПН 6-220 кВ такой необходимости в типовых случаях [30] никак не получается.

Итак, требования к удельной энергии ОПН:

- для ОПН 6-220 кВ определяются только грозowymi перенапряжениями;
- для ОПН 330-750 кВ определяются грозowymi перенапряжениями, а для длинных линий – коммутационными перенапряжениями.

Вместе с тем, некоторые специалисты ошибочно считают, что ОПН при установке на ВЛ должны быть отстроены от срабатываний при коммутационных перенапряжениях, поясняя это так:

- коммутационные перенапряжения, обладая заметной энергией, якобы расходуют ресурс варисторов ОПН, установленных по трассе ВЛ для защиты изоляции от грозových перенапряжений;
- для защиты изоляции ВЛ от коммутационных перенапряжений уже есть специальные ОПН, которые размещаются по концам ВЛ в распределительных устройствах.

Все эти рассуждения относительно влияния коммутационных перенапряжений на вопросы применения подвесных ОПН имеют под собой почву лишь тогда, когда речь идет об установке на трассе ВЛ единственного комплекта ОПН 330-750 кВ, предназначенного для защиты изоляции какой-то из опор от грозových перенапряжений. Однако, если для ограничения грозových перенапряжений на трассе ВЛ установлено несколько комплектов ОПН 330-750 кВ, то даже для протяженных ВЛ коммутационные перенапряжения перестают быть расчетными, поскольку их энергия делится между многими ОПН.

Для ВЛ 6-220 кВ, повторимся, вне зависимости от числа установленных ОПН об энергии коммутационных перенапряжений можно не думать.

2.3.2. Квазистационарные перенапряжения

По общему мнению современные ОПН не предназначены для ограничения квазистационарных перенапряжений, даже при большом числе параллельно работающих ОПН.

Повышение надежности работы ОПН возможно или за счет снижения уровня квазистационарных перенапряжений, или за счет изменения свойств самого ОПН (рис.2.4):

- увеличение высоты колонки варисторов, т.е. повышение по напряжению вольтамперной характеристики, иначе называемое «загрублением» ОПН;
- увеличение диаметра колонки варисторов, что при заданной высоте колонки означает увеличение массы ОПН, а значит его способности поглощать энергию перенапряжений без опасного перегрева.

Высота ОПН определяется требованиями к минимально допустимым расстояниям от токоведущих частей до заземленных. Защитные свойства варисторов таковы, что строительная высота ОПН оказывается больше, чем высота колонки варисторов. Для компенсации разницы высот ОПН и колонки варисторов в конструкции ОПН зачастую имеются алюминиевые шайбы (рис.2.4). В случае необходимости для увеличения высоты колонки варисторов достаточно заменить часть шайб на варисторы, что не изменит габаритов ОПН и почти не повлияет на его стоимость.

В случае необходимости увеличения диаметра варисторов придется изменять радиальные размеры всех элементов ОПН (варисторов, изоляции, фланцев), что ощутимо повысит стоимость ОПН.

Рассмотрим два ОПН с различными вольтамперными характеристиками, вольно показанными на рис.2.5. Пусть при заданном токе падение напряжения на втором ОПН будет на 10% выше, чем на первом: $U_2 = 1.1 \cdot U_1$. Тогда при воздействии на ОПН со стороны сети квазистационарных перенапряжений уровня U' или U'' соотношение токов в ОПН составит $I_2 = (0.5 \div 0.7) \cdot I_1$.

Видно, что из-за резко нелинейной характеристики ОПН небольшое повышение вольтамперной характеристики ОПН по напряжению приводит к заметно большему снижению токов в ОПН, а значит повышению его надежности. Иными словами, для достижения того же эффекта, что достигался при незначительном завышении высоты колонки варисторов (их вольтамперной характеристики), потребуется гораздо более заметное увеличение диаметра варисторов. Поэтому не должно вызывать сомнения, что при заданном уровне квазистационарных перенапряжений повышение надежности работы ОПН целесообразно только за счет некоторого увеличения высоты колонки варисторов, а не за счет увеличения ее диаметра.

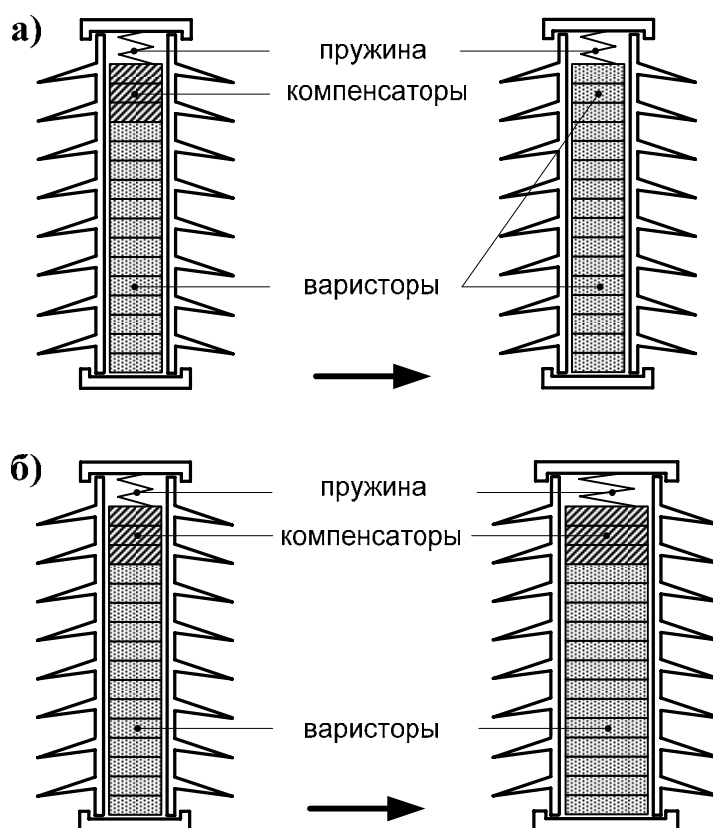


Рис.2.4. Различные способы повышения надежности работы ОПН: за счет увеличения высоты колонки варисторов (а) или диаметра колонки (б).

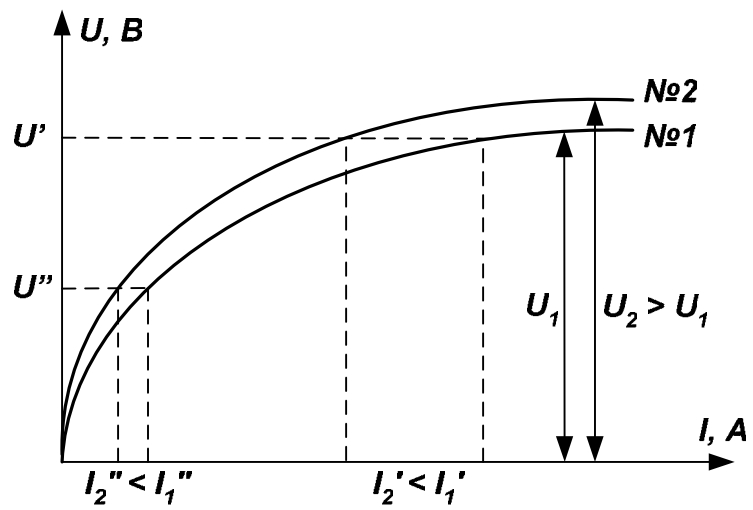


Рис.2.5. К вопросу о повышении надежности работы ОПН.

2.4. Основные типы ОПН и способ их присоединения к ВЛ

Существует два основных типа ОПН, предназначенных для защиты изоляции ВЛ от перенапряжений (рис.2.6) – ОПН без внешнего искрового промежутка и с ним.

ОПН с внешним искровым промежутком (ОПНИ) не следует путать с вентильными разрядниками. Действительно РВ и ОПНИ обладают последовательным искровым промежутком, однако имеются следующие отличия:

- в конструкции ОПНИ используется внешний искровой промежуток, а в конструкции РВ – внутренний;
- в конструкции ОПН и ОПНИ используются нелинейные элементы гораздо более совершенные, чем в конструкции РВ.

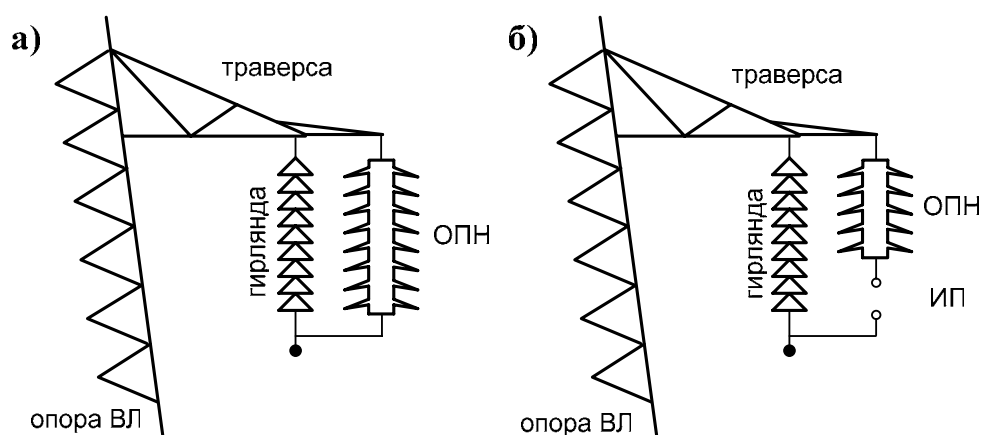


Рис.2.6. Принципиальные способы крепления ОПН к опоре: (а) – без искрового промежутка, (б) – через внешний искровой промежуток.

В конструкции ОПНИ искровой промежуток (ИП) настраивается на срабатывание при грозовых перенапряжениях, исключая воздействие на нелинейные элементы нормального рабочего напряжения сети, а также квазистационарных и коммутационных перенапряжений. Перечисленные особенности ОПНИ, как это принято считать, являются его преимуществами, однако, на самом деле:

- коммутационные перенапряжения следует учитывать лишь для протяженной воздушной линии 330-750 кВ и только тогда, когда на ней установлен единственный комплект ОПН;
- квазистационарные перенапряжения почти не представляют опасности для ОПН при верном выборе [30] его наибольшего рабочего напряжения $U_{нрО}$; для повышения надежности ОПН на ВЛ допустимо применять ОПН с повышенным $U_{нрО}$, поскольку изоляция ВЛ обладает большей импульсной прочностью по сравнению с внутренней изоляцией РУ;
- длительное воздействие на ОПН рабочего напряжения сети согласно исследованиям [31] приводит к восстановлению первоначальной вольтамперной характеристики ОПН, компенсируя деградацию свойств нелинейных элементов, вызванную прохождением импульсных токов;

- длительное воздействие напряжения «подсушивает» аппарат, снижая риск его увлажнения.

Лишь для длинных ВЛ 330-750 кВ при единичной установке ОПН наличие искрового промежутка является определенным преимуществом ОПН, тогда как в остальных случаях искровой промежуток – скорее недостаток. Кроме того, отсутствие искрового промежутка позволяет:

- ускорить вступление ОПН в работу по ограничению перенапряжений;
- исключить неверную работу промежутка вследствие ошибок монтажа;
- рассеивать энергию грозových перенапряжений одновременно в большом числе ОПН, снижая нагрузки на каждый из них и повышая надежность технического решения [32].

Важнейшим фактором, который следует учитывать при выборе способа присоединения ОПН к опоре, является возможность дальнейшей эксплуатации ВЛ в случае повреждения одного из установленных ОПН.

ОПНИ, как правило, имеет жесткое крепление к опоре, необходимое для обеспечения постоянства габаритов искрового промежутка. При выходе из строя ОПН, установленного через искровой промежуток, на ВЛ появляется место с ослабленной электрической прочностью. Обнаружение такого ОПН бывает затруднено, поскольку повреждение ОПН может никак не сказаться на его внешнем виде, а значит, не всегда этот аппарат возможно обнаружить визуальным осмотром при обходе ВЛ.

Отсутствие искрового промежутка делает возможным присоединение ОПН к опоре с помощью гибкого шлейфа, в который устанавливается специальное устройство – «отделитель» (рис.2.7,а). Отделитель:

- не проявляет себя в нормальном режиме работы, когда через ОПН проходят токи проводимости ОПН, составляющие доли миллиампер;
- не проявляет себя в режиме ограничения грозových и коммутационных перенапряжений, когда через ОПН проходят импульсные токи;
- разрушается (рис.2.7,б) при выходе ОПН из строя вследствие протекания в нем повышенных токов промышленной частоты.

В сети с заземленной нейтралью (в России это 110-750 кВ) в случае повреждения ОПН в нем пройдет ток однофазного короткого замыкания сети, который приведет к быстрому разрушению «отделителя» и отсоединению ОПН от линии еще до отключения ВЛ головными выключателями. Хотя линия будет кратковременно отключена, ее автоматическое повторное включение будет успешным. При этом наличие разорванного шлейфа не мешает дальнейшей эксплуатации ВЛ и при осмотре ВЛ однозначно указывает на поврежденный аппарат (рис.2.7,б).

В сети с изолированной или компенсированной нейтралью (в России это 6-35 кВ) в случае повреждения ОПН дело обстоит сложнее, так как в ОПН протекают лишь малые (емкостные) токи однофазного замыкания на землю, которые не способны привести к надежному срабатыванию обычного «отделителя». Отсутствие конструкции «отделителя» для сетей 6-35 кВ до недавнего времени было фактором, серьезно сдерживающим применение ОПН

на ВЛ 6-35 кВ. В настоящее время такая конструкция, получившая название «универсальный отделитель» (УО), разработана, испытана и запатентована.

При однофазном замыкании в сетях 6-35 кВ вследствие малости токов релейная защита не может селективно выявить фидер с повреждением изоляции, а работает лишь на сигнализацию. Если замыкание на землю связано с повреждением одного из установленных на линии ОПН, то через несколько минут его УО разрушится, отсоединив ОПН от линии, восстановив нормальный режим работы линии и приведя к исчезновению сигнализации.

При многофазных повреждениях в сети 6-35 кВ токи короткого замыкания уже достаточны для селективной работы релейной защиты. Если одно из них связано с повреждением установленного на линии ОПН, то в таком ОПН пройдет ток короткого замыкания, который приведет к быстрому (за доли секунды) разрушению соответствующего УО, разрыву шлейфа и отсоединению ОПН от линии еще до отключения ВЛ головными выключателями. При этом разрыв шлейфа:

- не дает поврежденному ОПН мешать дальнейшей эксплуатации ВЛ, обеспечивая успешность АПВ;
- уменьшает число мест сети с нарушением изоляции;
- при осмотре ВЛ однозначно укажет на поврежденный аппарат (рис.2.7,б).

Наличие у ОПН искрового промежутка, не позволяющее использовать какой-либо отделитель, может быть оправдано лишь в некоторых случаях при единичной установке ОПН на протяженных ВЛ 330-750 кВ. Во всех остальных случаях присоединение ОПН к ВЛ должно быть безыскровым:

- через УО в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью;
- через УО или обычный «отделитель» в сетях с заземленной нейтралью.

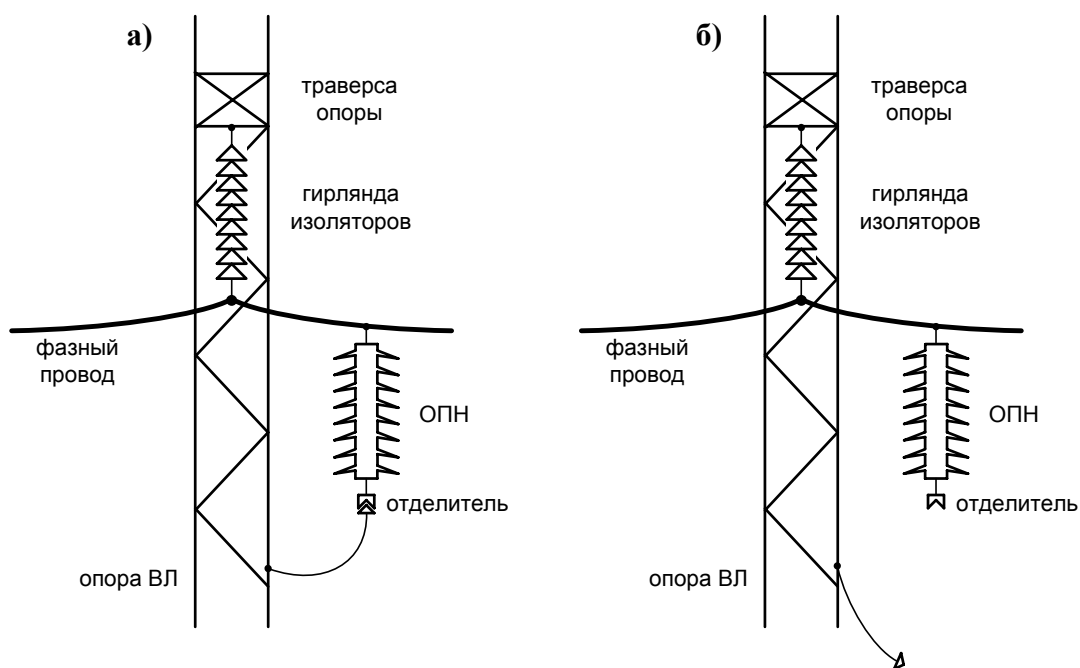


Рис.2.7. Вариант присоединения к опоре ОПН без искрового промежутка через отделитель: (а) – до повреждения ОПН, (б) – после повреждения.

2.5. О выборе характеристик ОПН для защиты изоляции ВЛ

В [30] показано, что для заданной конструкции (производителя) ОПН выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН и его удельной энергии (тока пропускной способности) практически однозначно определяет остальные параметры ОПН, связанные со свойствами варисторов. Иными словами, выбор ОПН сводится к определению его наибольшего рабочего напряжения $U_{нрО}$ и удельной энергии $W_{уд}$, иначе называемой энергоемкостью, с последующей проверкой соответствия прочих характеристик (остающихся напряжений и др.) выбранного типа ОПН конкретным условиям эксплуатации.

1. Выбор рабочего напряжения ОПН зависит:

- от способа заземления нейтрали сети;
- от способа присоединения ОПН к опоре (через ИП или без него).

В случае безыскрового присоединения ОПН наибольшее рабочее напряжение $U_{нрО}$ следует принимать:

- в сети с изолированной (компенсированной) нейтралью несколько больше линейного значения наибольшего рабочего напряжения сети $U_{нр}$;
- в сети с эффективно заземленной нейтралью несколько больше фазного значения наибольшего рабочего напряжения сети $U_{нр} / \sqrt{3}$.

В случае присоединения через ИП понятие $U_{нрО}$ отчасти теряет смысл, так как длительно напряжение промышленной частоты на нелинейные элементы не воздействует. Однако, поскольку на стадии изготовления элементов место их использования известно не всегда, все же будем пользоваться $U_{нрО}$, которое при наличии ИП не имеет смысла выбирать больше, чем было бы выбрано $U_{нрО}$ в случае без искрового промежутка. Конкретное же значение $U_{нрО}$ определяется способностью искрового промежутка надежно гасить ток промышленной частоты, который протекает после его срабатывания: чем меньше $U_{нрО}$, тем большие токи промышленной частоты будут протекать в ОПН после срабатывания ИП и тем сложнее будет осуществить их надежное гашение.

2. Выбор энергоемкости ОПН зависит:

- от способа присоединения ОПН к опоре (через ИП или без него);
- от сопротивления заземления опоры;
- от факта наличия и конкретного числа молниезащитных тросов;
- от числа опор, на которых установлены ОПН;
- от числа фаз на опоре, в которые установлены ОПН;
- от требуемой надежности, т.е. приемлемой вероятности повреждений ОПН вследствие разрядов молнии.

При использовании ОПН на опорах воздушной линии выбор удельной энергии должен быть тщательно обоснован. В случае присоединения ОПН через искровой промежуток удельная энергия, как правило, должна принимать больше, чем у ОПН без искрового промежутка, поскольку наличие искрового промежутка затрудняет взаимную помощь ОПН разных опор и фаз в деле рассеивания энергии грозových перенапряжений.

2.6. Связь импульсных токов и напряжений стандартной формы

Изоляция воздушных линий и оборудования распределительных устройств испытывается стандартными грозowymi импульсами напряжения формы 1.2/50 мкс, тогда как защитные характеристики ОПН в режиме ограничения грозowych перенапряжений указываются на импульсных токах формы 8/20 мкс. Для пояснения связи импульсных токов и напряжений стандартной формы приведем небольшой пример.

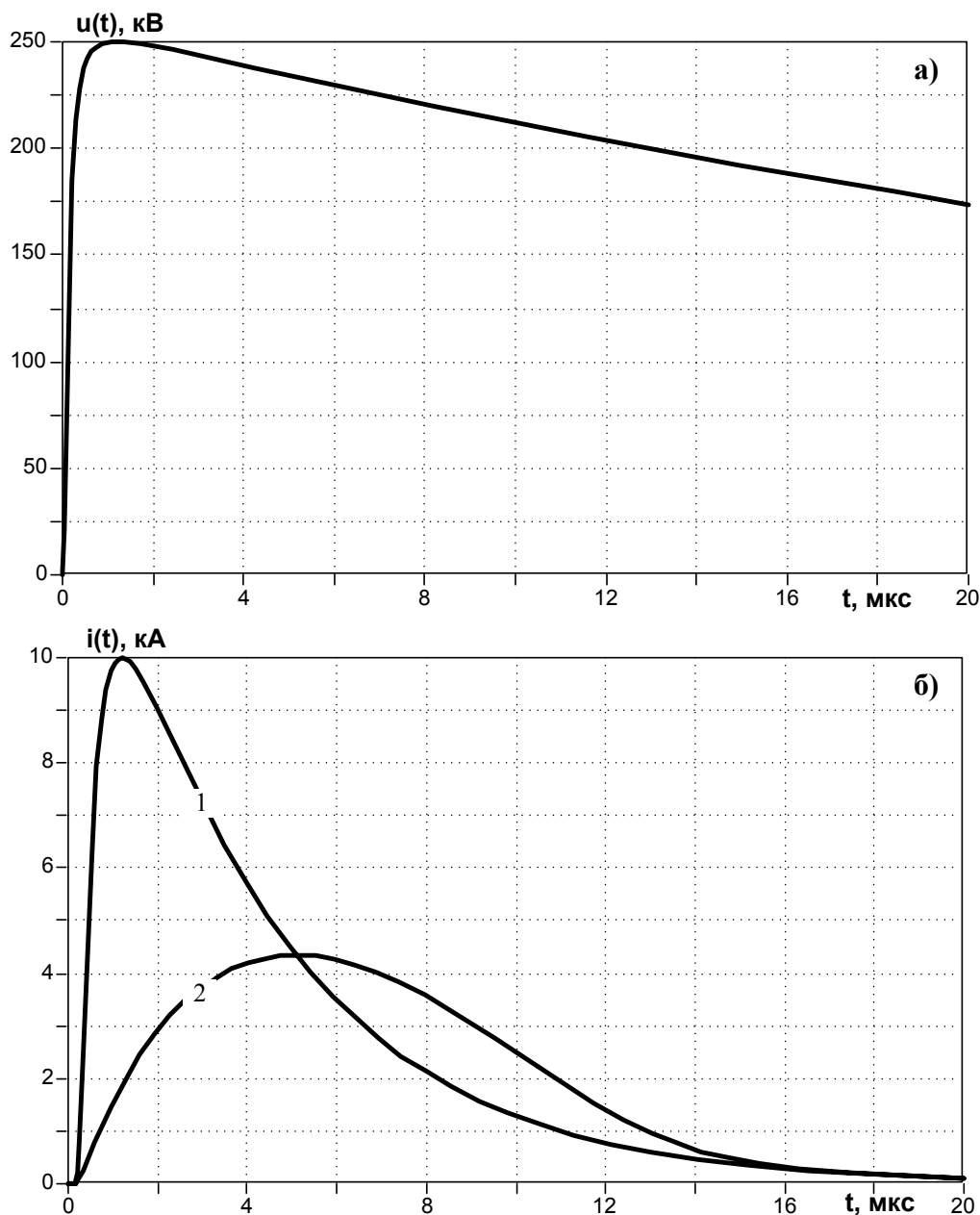


Рис.2.8. Стандартный грозовой импульс напряжения (а) и импульсные токи в ОПН (б):
1 – индуктивность в цепи ОПН равна 0;
2 – индуктивность в цепи ОПН равна 20 мкГн (индуктивность участка опоры).

Рассмотрим ОПН 110 кВ, для которого остающееся напряжение при грозowych импульсных токах величины 10 кА составляет 250 кВ. Пусть к такому ОПН присоединен мощный источник импульсных напряжений, внутренним сопротивлением которого можно пренебречь по сравнению с сопротивлением

самого ОПН. Тогда для импульса напряжения 1.2/50 мкс величины 250 кВ ток в ОПН будет иметь вид, показанный на рис.2.8 (кривая 1). Если в цепи ОПН имеется индуктивность всего 20 мкГн (индуктивность соединительных проводов и шлейфов, индуктивность опоры или ее заземлителя), то величина и форма тока (кривая 2) серьезным образом изменятся.

Представленный рис.2.8 иллюстрирует очевидные выводы относительно работы ОПН при грозовых перенапряжениях:

- длительность импульсного тока в ОПН, учитывая нелинейность его вольтамперной характеристики, оказывается короче, чем длительность воздействующего импульсного напряжения;
- длительность фронта импульсного тока в ОПН, учитывая индуктивность в цепи ОПН, оказывается больше, чем длительность фронта воздействующего импульсного напряжения.
- скорость вступления ОПН в работу (скорость реакции на приложенное напряжение) определяется не его физическими свойствами, а индуктивностью в цепи присоединения ОПН, которую, если возможно, рекомендуется уменьшать.

3. Подробные расчеты грозовых процессов на примере ВЛ 110 кВ

3.1. Описание расчетной модели

В случае прямых разрядов молнии в воздушную линию расчет переходных процессов удобно вести с использованием известного канадско-американского программного комплекса ЕМТР (Electromagnetic Transients Program [33,34]). Несомненными достоинствами ЕМТР является то, что эта программа хорошо известна во всем мире, проверена и отлажена за многие годы ее использования инженерами разных стран при решении всевозможных электротехнических задач. Для расширения области применения ЕМТР ее разработчиками предусмотрена возможность составления расчетных схем не только из имеющихся в базе типовых элементов, но и возможность программирования принципиально новых элементов и блоков, которая позволила учесть необходимые для анализа грозовых перенапряжений вольт-секундную характеристику изоляции ВЛ и статистические данные по параметрам импульса тока молнии.

Отметим, что разработчиками ЕМТР проведение статистических расчетов предполагалось лишь в рамках исследования процессов при коммутациях выключателей, однако возможность программирования позволила успешно использовать ЕМТР и для анализа процессов при разрядах молнии.

При разрядах молнии в ВЛ факт перекрытия изоляции, а также токовые и энергетические нагрузки на установленные на линии ОПН, определяются несколькими ближайшими к месту разряда молнии опорами пораженной ВЛ. Поэтому при разрядах молнии в ВЛ следует подробно моделировать лишь несколько пролетов и опор ВЛ, примыкающих к месту разряда молнии, тогда как остатки трассы линии, примыкающие слева и справа к подробно учтенному участку, достаточно моделировать упрощенно, т.е. без прорисовки всех установленных на них опор.

Пример полной расчетной ЕМТР-схемы для одноцепной ВЛ с треугольным расположением фаз приведен на рис.3.1, где разряд молнии происходит в трос на опоре №3. Для снижения размеров схемы показано лишь пять подробно учтенных опор, хотя все расчеты далее будут выполнены в схеме при подробном учете сразу девяти опор. На рис.3.1 «жирные» соединительные линии отвечают трехфазным соединениям элементов, а «тонкие» линии – однофазным соединениям.

Все пролеты ВЛ, а также примыкающие к ним слева и справа концевые участки большой длины, моделируются как многопроводные линии с распределенными параметрами с учетом их частотных зависимостей. Для этого пользователь задает известное ему пространственное расположение фазных проводов и тросов друг относительно друга и относительно земли, после чего программа ЕМТР автоматически рассчитывает матрицы [26] собственных и взаимных параметров ВЛ.

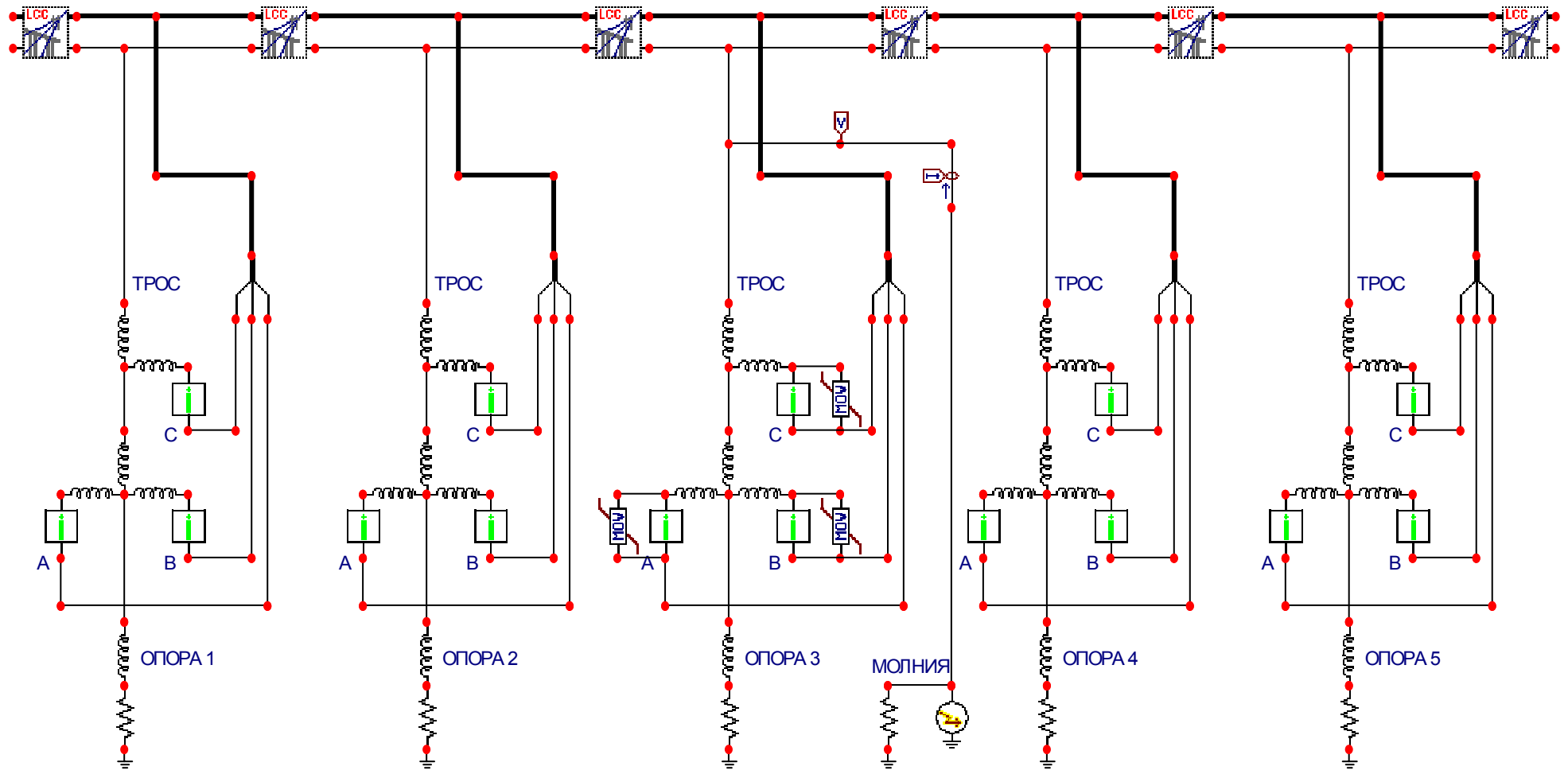


Рис.3.1. EMTP-схема для расчета переходных процессов при разрядах молнии в одноцепную ВЛ с треугольным расположением фаз.

В местах сопряжения пролетов ВЛ в схему рис.3.1 введены модели опор, представляющих из себя набор индуктивностей, величины которых определены с использованием геометрии опоры и известных погонных индуктивностей ее элементов; каждая опора связана с землей через активное сопротивление R_3 , моделирующее заземляющее устройство.

На схеме рис.3.1 на каждой из опор фазные провода (условно обозначены «А,В,С») от соответствующих им траверс отделены гирляндами линейных изоляторов, которые учтены своими вольт-секундными характеристиками (блоки вольт-секундных характеристик обозначены «i» от англ. «insulation» - изоляция).

Для всех элементов схемы можно рассчитывать токи и напряжения, и, в частности, на рис.3.1 измеряется ток молнии и потенциал вершины поражаемой опоры №3. Для определения энергии, поглощенной установленными на опоре №3 ограничителями перенапряжений, в ЕМТР предусмотрено интегрирование во времени произведения тока и напряжения на зажимах ОПН согласно

$$W_{\text{ОПН}} = \int_0^t u_{\text{ОПН}}(t) i_{\text{ОПН}}(t) dt .$$

В схеме рис.3.1 и в ЕМТР-расчетах опущены следующие факторы:

- импульсная корона на проводах и тросах, учет которой важен, прежде всего, для верного анализа грозовых перенапряжений на изоляции распределительных устройств [34];
- зависимость сопротивления заземления опоры от тока в заземлителе (не учтено искрообразование при больших токах);
- наличие рабочего напряжения на фазных проводах (учет рабочего напряжения проводится при анализе процессов на ВЛ 500-750 кВ, а для ВЛ 6-330 кВ его допустимо не учитывать, поскольку рабочее напряжение почти не оказывает влияния на вероятность разряда молнии в элементы ВЛ и среднюю вероятность перекрытия изоляции);
- наличие концевых распределительных устройств, влияние которых на процессы на ВЛ заметно лишь при малой длине ВЛ;
- зависимость волнового сопротивления канала молнии от тока молнии [2].

Кратко остановимся на вопросах моделирования основных элементов расчетной ЕМТР-схемы, таких как ВЛ, ОПН, молния.

3.1.1. Моделирование воздушной линии

Воздушная линия моделируется подробно в трехфазной постановке в соответствии со своими конструктивными особенностями, т.е. типом опор и длинами пролета, типом фазных проводов и тросов, величиной сопротивления заземления опор и вольт-секундной характеристикой изолирующих подвесок.

Опора ВЛ. Моделируемые опоры могут быть приняты:

- одинаковыми, соответствующими типовой конструкции промежуточной опоры, наиболее широко применяемой для ВЛ рассматриваемого класса номинального напряжения;

– различными, характерными для выбранного участка конкретной ВЛ.

В любом из двух указанных случаев схема замещения каждой опоры представляет собой набор индуктивностей, величины которых определены с использованием известной геометрии опоры. Так, на рис.3.2 в качестве примера представлены габариты железобетонной опоры ПБ-110.5, взятые по данным [21], и схема ее замещения, при составлении которой погонная индуктивность элементов опоры принята равной 1 мкГн/м (по данным [2] индуктивность разных опор лежит в диапазоне 0.5 ÷ 1.0 мкГн/м).

В нормативных документах и протоколах измерений, как правило, указаны сопротивления «растекания», полученные на постоянном токе, однако для расчета грозовых перенапряжений требуется величина импульсного сопротивления опор. Не будем детализировать схему замещения заземляющего устройства, а предположим, что при всех возможных параметрах грозовых импульсных токов в опоре ее импульсное сопротивление одинаково и равно R_3 .

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 на опоре и стрелы провеса в средней части пролета. Длины пролетов могут быть приняты:

- одинаковыми, т.е. усредненными (например, по [21]), равными для ВЛ 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ, соответственно, 250, 300, 350, 400, 450, 500 м;
- различными, характерными для выбранного участка конкретной ВЛ.

Удельное сопротивление грунта по трассе ВЛ, используемое программой ЕМТР при определении матриц собственных и взаимных параметров ВЛ, достаточно принять неким усредненным, равным $\rho_3 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

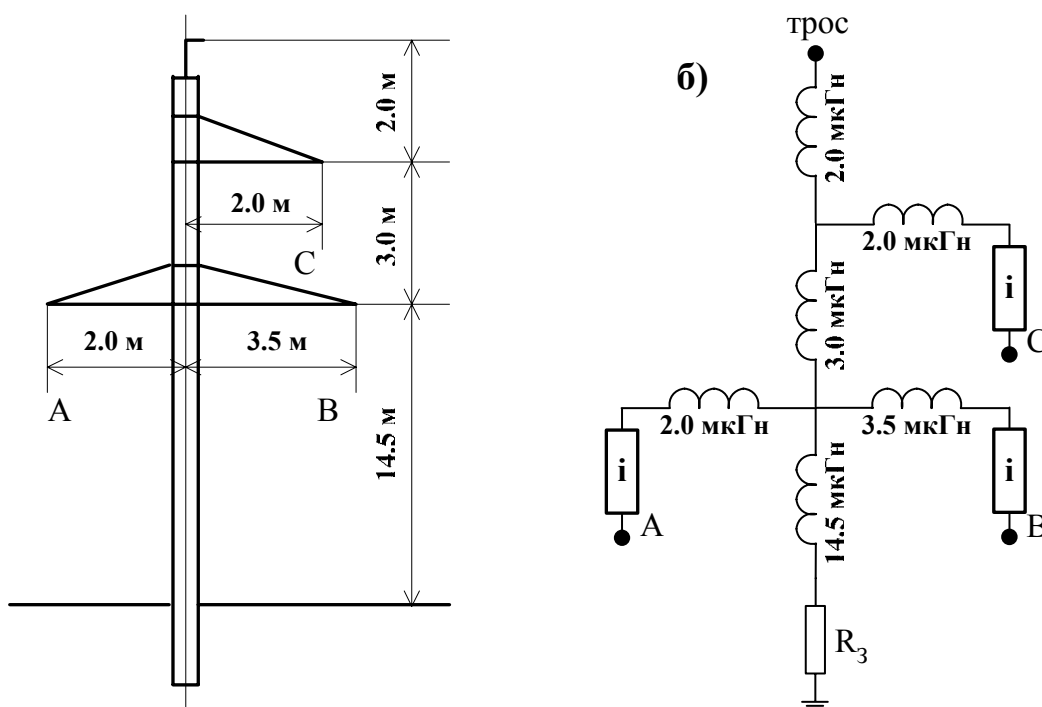


Рис.3.2. Одноцепная опора ПБ 110.5: основные размеры (а) и схема замещения (б).

Изоляция ВЛ. Перекрытие изоляции ВЛ 35-750 кВ наиболее вероятно на опоре, вдоль изолирующей подвески, 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) [2,18]. При воздействиях, по форме близких к стандартному грозовому импульсу 1.2/50 мкс, согласно [18] вольт-секундная характеристика (в кВ) описывается удобным выражением

$$u(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}}, \quad (3.1)$$

где t – предразрядное время (в мкс), а коэффициенты K_1 и K_2 находятся по длине гирлянды изоляторов $L_{ИЗ}$ (выраженной в метрах) как $K_1 = 400 \cdot L_{ИЗ}$, $K_2 = 710 \cdot L_{ИЗ}$. Длины гирлянд изоляторов могут быть приняты:

- одинаковыми, т.е. усредненными (по табл.1.2);
- различными, характерными для каждой опоры ВЛ и ее фазы.

В случае превышения воздействующим на изоляцию напряжением значения, определяемого по вольт-секундной характеристике (3.1), блок «i» фиксирует факт пробоя изоляции и электрически соединяет соответствующий фазный провод с траверсой опоры; блок запускается только в случае превышения напряжения на изоляции минимального значения U_0 , отвечающего амплитуде фазного значения рабочего напряжения линии.

3.1.2. Моделирование импульса тока молнии

При решении задач грозозащиты для моделирования тока молнии часто используется двухэкспоненциальный импульс [2,35,36]

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

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

Натурные осциллограммы токов молнии [1,2] 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 [35,36]

$$i(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t) \cdot y(t) = I_{\max} \cdot z(t) \cdot y(t), \quad (3.2)$$

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.

В расчетах процессов при разрядах молнии ее принято представлять как параллельное соединение источника тока и активного сопротивления, равного

волновому сопротивлению канала молнии. Сопротивление канала молнии составляет по различным оценкам величину $300 \div 1500$ Ом [1,2].

При расчетах в ЕМТР ток источника тока описывается выражением (3.2), у которого принято $n = 5$, а сопротивление канала молнии принято 1000 Ом.

3.1.3. Моделирование ОПН

Известны различные модели ОПН, как простые в виде нелинейного сопротивления, так и сложные, содержащие несколько нелинейных сопротивлений, соединенных друг с другом с использованием емкостей, индуктивностей, резисторов. В подавляющем числе задач вполне достаточно представлять ОПН в виде одного нелинейного активного сопротивления [35], вольтамперная характеристика которого задается или набором известных точек, или аналитически выражением

$$U = AI^\alpha. \quad (3.3)$$

В ЕМТР при расчетах грозовых перенапряжений была использована зависимость (3.3), где принято $\alpha = 0.08$. Коэффициент A зависит от характеристик ОПН и может быть найден по одной известной точке вольтамперной характеристики моделируемого ОПН, в качестве которой, как правило, используется остающееся напряжение на импульсе тока формы 8/20 мкс с максимальным значением 10 кА.

3.1.4. Статистические расчеты в ЕМТР

Разработанная в ЕМТР модель для расчета грозовых перенапряжений на изоляции ВЛ учитывает не только статистическую природу параметров импульса тока молнии, но и позволяет варьировать место разряда молнии в ВЛ (в фазный провод, в опору, в трос).

Для выбранного места разряда молнии (на рис.3.1 это опора №3) в модели многократно повторяется расчет переходных процессов на ВЛ при заданных временном интервале и шаге расчета. В каждом из «экспериментов»:

- параметры импульса тока молнии принимаются случайным образом с учетом выбранного закона их распределения (приняты статистические данные НИИПТ по [2], хотя по желанию в ЕМТР могут быть заложены и любые другие);
- фиксируются максимальные значения y_M интересующей переменной y : напряжение на изоляции (кВ), ток в ОПН (кА), энергия в ОПН (кДж).

В качестве примера в табл.3.1 приведены результаты ЕМТР расчетов, при которых в серии из $N = 5$ экспериментов определялись максимальные значения y_M некоторой переменной y . Дальнейшая обработка результатов экспериментов табл.3.1 предполагает их сортировку по возрастанию значений, после чего получается табл.3.2, которую можно прокомментировать так:

- во всех $N = 5$ экспериментах значение y_M было не менее 430 – поэтому можно считать, что вероятность превышения переменной y значения $y_M = 430$ составляет $P(y \geq y_M) = 1$;

- лишь в четырех экспериментах значение y_M было не менее 760 – поэтому можно считать, что вероятность превышения переменной x значения $y_M = 760$ составляет $P(y \geq y_M) = 0.8$;
- аналогичные комментарии для других величин y_M .

После составления табл.3.2 целесообразно получить ее графическую интерпретацию – зависимость вероятности P превышения переменной y значения y_M . Качественный вид такой зависимости дан на рис.3.3.

Табл.3.1. Результаты ЕМТР расчетов в серии из $N = 5$ экспериментов.

Номер эксперимента	y_M (кВ, кА, кДж)
1	760
2	1320
3	430
4	810
5	1290

Табл.3.2. Результаты $N = 5$ экспериментов после их обработки.

Новый номер	$P(y \geq y_M)$, о.е.	y_M (кВ, кА, кДж)
1	1.0	430
2	0.8	760
3	0.6	810
4	0.4	1290
5	0.2	1320

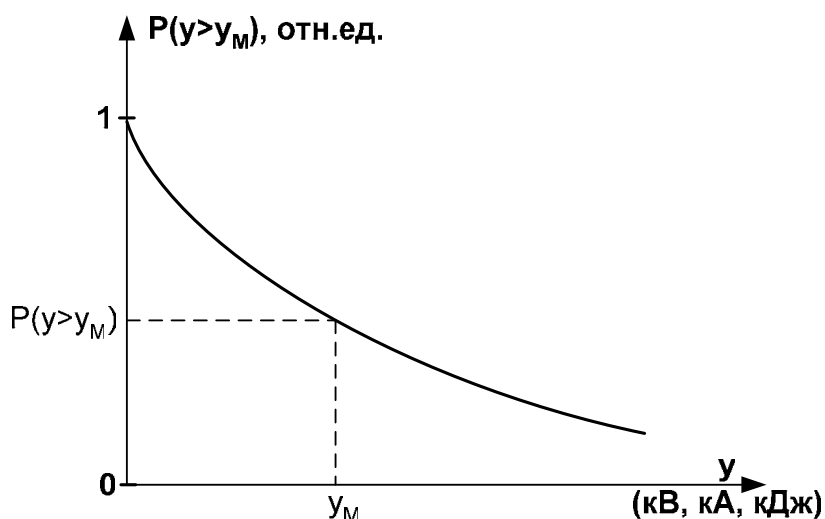


Рис.3.3. Зависимость вероятности P превышения переменной y значения y_M .

Вероятность перекрытия изоляции – это конкретное число, и, следовательно, требуются пояснения, как именно можно получить его с использованием зависимостей типа рис.3.3. При исследовании в ЕМТР числа перекрытий изолирующей подвески в качестве переменной y следует выбрать

ток I в той траверсе опоры ВЛ, на которой закреплена эта подвеска, т.е. ток в индуктивности, моделирующей соответствующую траверсу. Тогда после обработки серии экспериментов будет получена зависимость вида рис.3.4, которая отличается от рис.3.3 тем, что начинается не из точки $P=1$, а из точки $P=P_{из} < 1$. Иными словами: ток в траверсе (перекрытие изоляции) появляется не в каждом эксперименте (не при каждом разряде молнии), а только в некоторых случаях. Поэтому значение $P_{из}$, при котором уже появляется ток в траверсе $I > 0$, и является искомой вероятностью перекрытия изолирующей подвески.

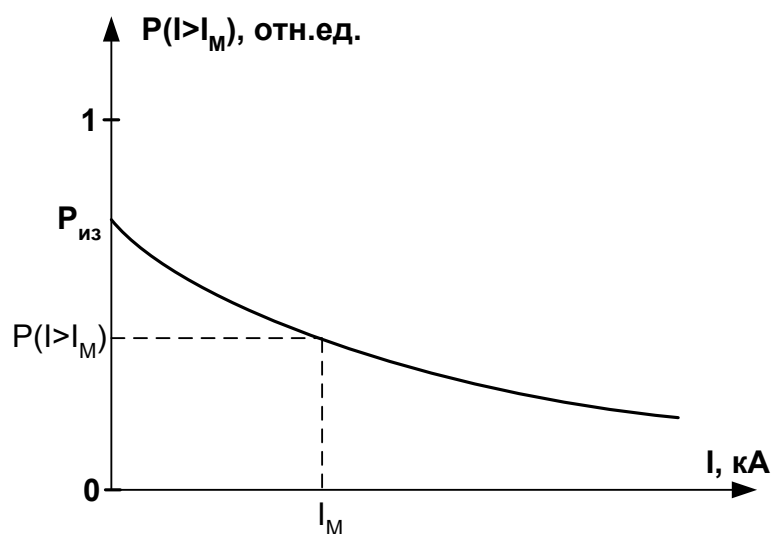


Рис.3.4. Зависимость вероятности P превышения током в траверсе значения I_M .

Очевидно, что чем большее число экспериментов N будет проведено, тем большее число точек будет использовано при построении зависимости $P(y \geq y_M)$, а значит – все достовернее будут конкретные значения вероятности (в частности, значения $P_{из}$). Исследования в программе ЕМТР позволили понять, что серия из $N = 5000$ экспериментов вполне достаточна для получения стабильного значения искомой вероятности.

3.2. Обоснование эффективности традиционных способов повышения грозоупорности на примере разряда молнии в опору или трос

С помощью подробной ЕМТР-модели были проведены расчеты грозовых переходных процессов на ВЛ 110 кВ, сооруженной на опорах ПБ.110-5 при длине пролета 300 метров.

В случае разрядов молнии в заземленные части конструкции ВЛ 110 кВ для различных сопротивлений заземления опор были построены кривые вида рис.3.4, а после их обработки получен рис.3.5, на котором даны зависимости вероятности перекрытия изоляции фаз «А», «В», «С» от сопротивления заземления опоры:

- пунктирная линия отвечает случаю разряда молнии в опору ВЛ без троса;
- сплошная линия отвечает случаю разряда молнии в трос; при «обстреле» троса вероятность разряда молнии в трос считается одинаковой и для участка троса вблизи от опоры, и для участка троса в средней части пролета между опорами.

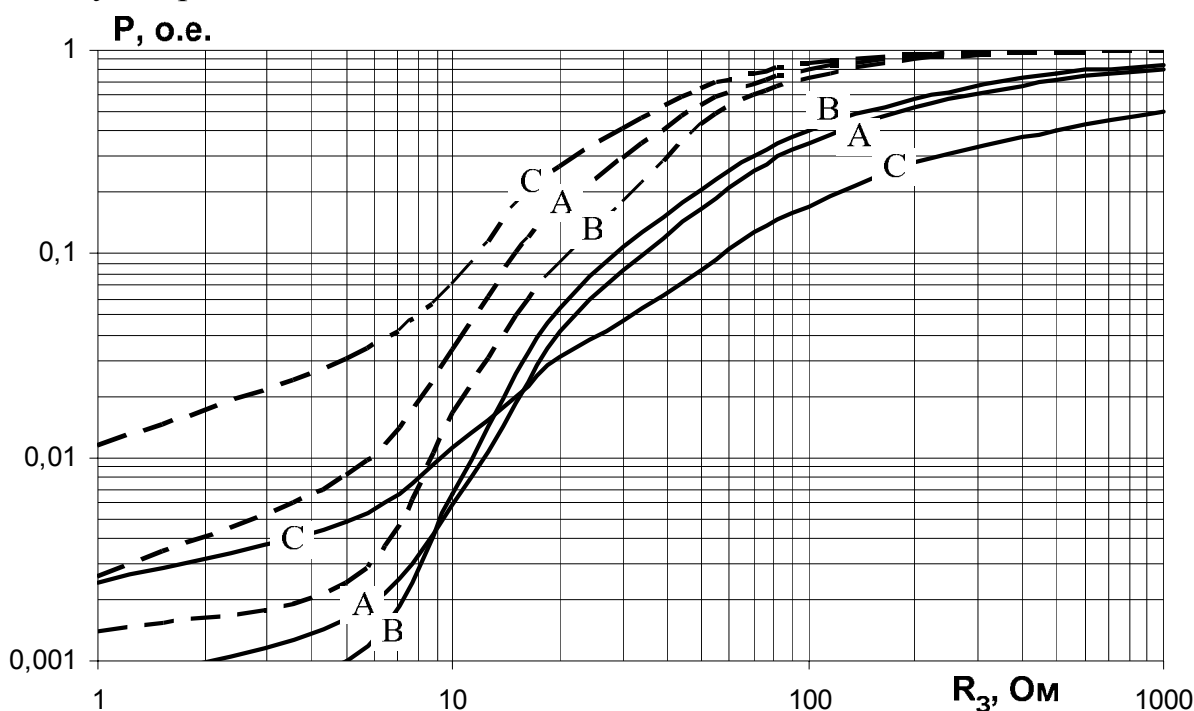


Рис.3.5. Вероятность перекрытия изоляции различных фаз одноцепной ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор: пунктирная линия – при разрядах молнии в опору линии без троса; сплошная линия – при разрядах молнии в трос линии с тросом.

Из рис.3.5 видно: даже при весьма малых сопротивлениях заземления вероятны перекрытия изоляции ВЛ 110 кВ. Дело в том, что при разряде молнии в трос или опору по опоре в землю стекает импульсный ток, создающий падение напряжения и на заземляющем устройстве опоры $R_3 \cdot i_{оп}(t)$, и на индуктивности участка опоры от земли до траверсы $L_{ТРАВ} \cdot di_{оп}(t)/dt$.

Высокое напряжение на опоре относительно фазного провода приводит к перекрытию изоляции с заземленной траверсы на фазный провод, т.е. к «обратному» перекрытию. Вследствие наличия падения напряжения на

индуктивности опоры даже идеальное заземление опоры $R_3 \approx 0$ не гарантирует отсутствия обратных перекрытий изоляции ВЛ 110 кВ при ударах молнии в ее трос или опору. Поскольку для верхних фаз ВЛ 110 кВ индуктивность $L_{ТРАВ}$ участка опоры до заземляющего устройства оказывается больше, то на рис.3.5 (пунктир) для верхней фазы «С» зафиксирована повышенная вероятность перекрытия изоляции по сравнению с нижними фазами «А» и «В».

Для линии с тросом по рис.3.5 (сплошная линия) верхняя фаза «С» является определяющей в числе обратных перекрытий лишь при «малых» сопротивлениях заземления, когда слабо влияние установленного троса на пути растекания тока молнии. При «больших» сопротивлениях заземления ток молнии стекает в землю не только через заземляющее устройство ближайшей опоры, но и по тросу направляется в заземляющие устройства соседних опор (рис.3.6,а). Наличие напряжения на тросе и опоре $u_{оп}(t)$ приводит к наводкам на фазные провода $u_{ф}(t) = K_{фТ} \cdot u_{оп}(t)$, где $K_{фТ}$ – так называемый коэффициент связи провода и троса [2]. Наводки (или коэффициент $K_{фТ}$) оказываются максимальными для верхнего фазного провода «С», наиболее близко расположенного к тросу и, следовательно, для верхней фазы будет наименьшим напряжение на изоляции $(1 - K_{фТ}) \cdot u_{оп}(t)$ и вероятность ее перекрытия, что видно из рис.3.5 (сплошная линия) при «больших» сопротивлениях.

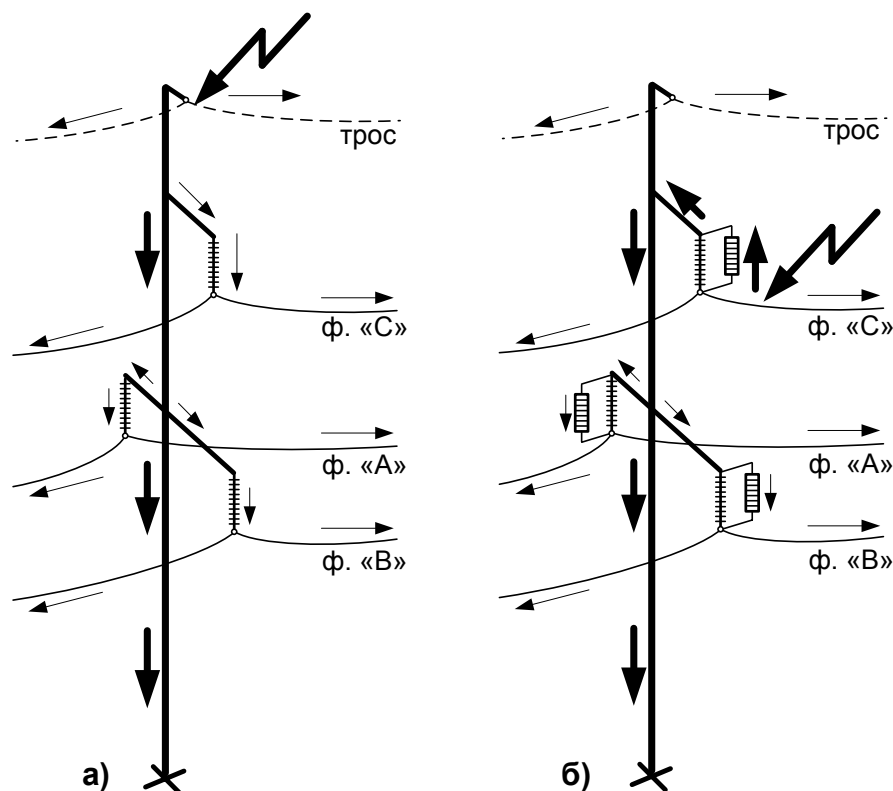


Рис.3.6. Иллюстрации путей растекания тока молнии, необходимые для пояснения процессов при разрядах: (а) - в трос или опору линии без ОПН, (б) - в фазный провод линии с ОПН.

В сети 110 кВ с заземленной нейтралью для возникновения короткого замыкания и появления необходимости отключения ВЛ достаточно перекрытия изоляции хотя бы одной из трех фаз. Поэтому далее будем рассматривать лишь

максимальную среди всех фаз вероятность перекрытия изоляции ВЛ – для рис.3.5 такая вероятность показана на рис.3.7 (сплошная кривая №2 и пунктирная кривая №2). Кривые №1 и №3 получены в случае, когда длина гирлянды изоляторов ВЛ 110 кВ отлична от ранее заложенных в расчеты $L_{ИЗ} = 1.25$ м.

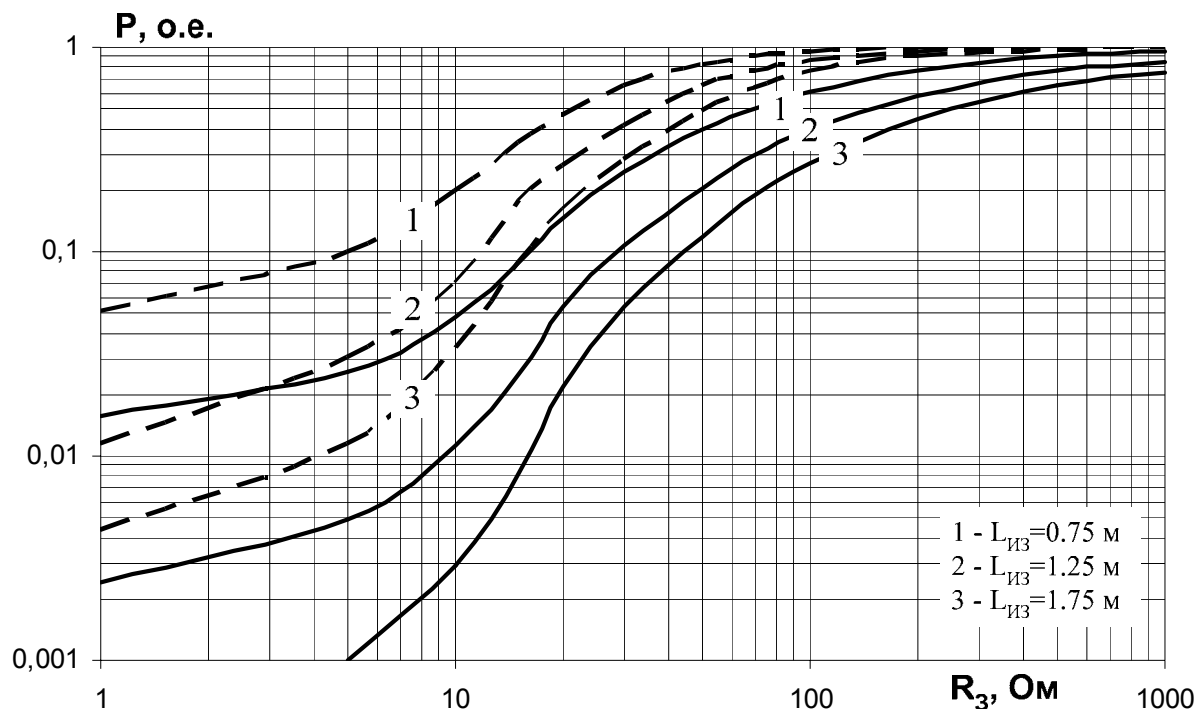


Рис.3.7. Вероятность перекрытия изоляции одноцепной ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор и длины гирлянды изоляторов: пунктирная линия – при разрядах молнии в опору линии без троса; сплошная линия – при разрядах молнии в трос линии с тросом.

Кривые, приведенные на рис.3.7, иллюстрируют известный факт того, что для снижения вероятности перекрытия изоляции ВЛ требуется:

- снижение сопротивления $R_з$ заземления опор;
- повышение прочности изоляции ВЛ (повышение $L_{ИЗ}$);
- установка тросовой защиты.

Для более широкого диапазона длин $L_{ИЗ} = 0.25 \div 2.25$ м, охватывающего классы напряжения от 10 кВ до 220 кВ, эффективность традиционных средств повышения грозоупорности ВЛ можно оценить по рис.3.8. В случае применения средств повышения грозоупорности ВЛ для перекрытия ее изоляции требуются все большие токи молнии, вероятность появления которых все меньше. Поскольку данные по молнии таковы, что в области больших токов вероятность появления токов молнии еще большей величины резко снижается, то согласно рис.3.8 получается:

- каждое дополнительное уменьшение сопротивления заземления опор влияет на число перекрытий изоляции ВЛ все более ощутимо;

- при усиленной изоляции установка троса снижает число перекрытий изоляции ВЛ в большее число раз, нежели это происходит для недостаточно прочной изоляции;
- установка троса существенно эффективнее при малых сопротивлениях заземления R_3 опор, нежели при повышенных.

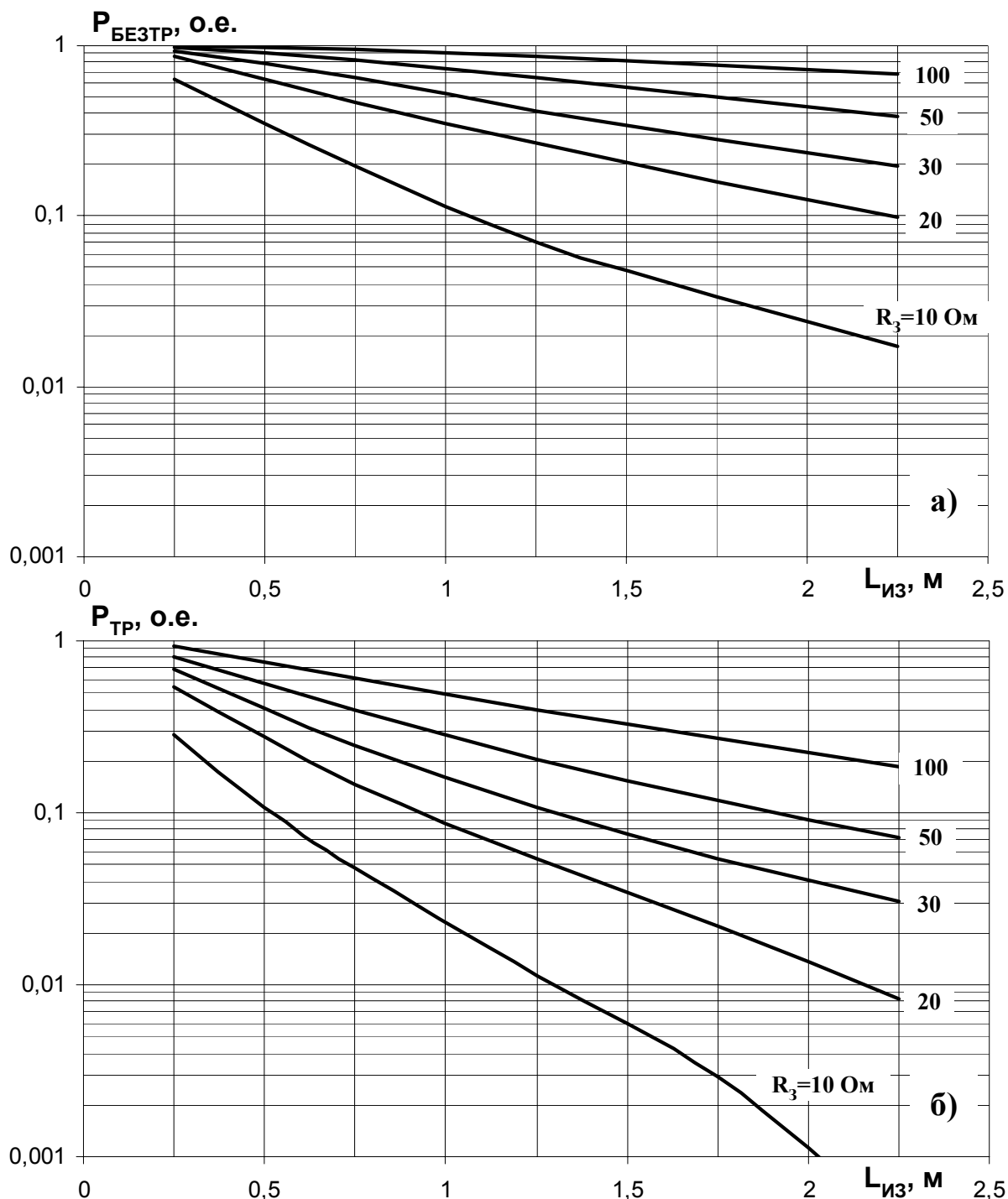


Рис.3.8. Вероятность перекрытия изоляции одноцепной ВЛ 110 кВ в зависимости от сопротивления заземления опор и длины гирлянды изоляторов: (а) – при разрядах молнии в опору линии без троса, (б) – при разрядах молнии в трос линии с тросом.

Влияние троса дополнительно отображено на рис.3.9, полученном на основе рис.3.8. Ясно видно, во сколько много раз удается снизить вероятность перекрытия изоляции ВЛ, если трос устанавливать на линиях с высокой прочностью изоляции и малыми сопротивлениями заземления опор. Данные рис.3.9 еще раз иллюстрируют неэффективность троса при прямых разрядах молнии в ВЛ 6-10 кВ с низкой импульсной прочностью изоляции.

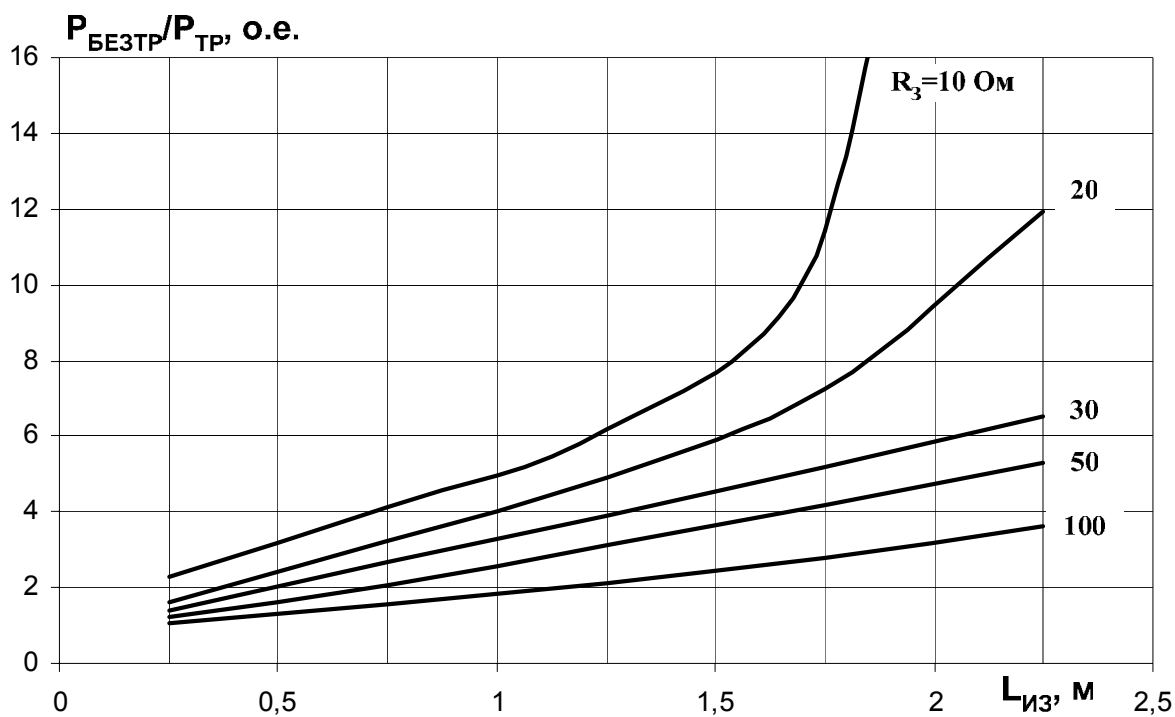


Рис.3.9. Эффективность установки троса при разрядах молнии в заземленные части ВЛ в зависимости от сопротивления заземления опор и длины гирлянды изоляторов.

3.3. Обоснование частоты установки ОПН вдоль трассы ВЛ на примере разряда молнии в фазный провод

Перекрытие изоляции ВЛ 110 кВ возможно, главным образом, на опорах вдоль гирлянд изоляторов. На опоре с ОПН при верном выборе его характеристик перекрытие изоляции защищенных фаз исключено, но способен ли ОПН в достаточной мере снижать грозовые перенапряжения на изоляции других опор?

Здесь и далее будем полагать, что ОПН не имеет искрового промежутка, поскольку именно такие аппараты следует применять при массовой установке ОПН вдоль трассы ВЛ. Характеристики ОПН, закладываемые в расчеты, примем как у ОПН 110 кВ с наибольшим рабочим напряжением $U_{нрО} = 88$ кВ и остающимся напряжением 250 кВ при импульсном токе 10 кА.

На рис.3.10 показан фрагмент одноцепной ВЛ 110 кВ, на которой ОПН установлены не на каждой опоре, а через опоры. Для простоты положим, что на ВЛ нет троса, а разряд молнии происходит в верхний фазный провод (точки №1,2,3). Вероятность перекрытия изоляции незащищенной опоры в зависимости от координаты x места разряда молнии дана на рис.3.11.

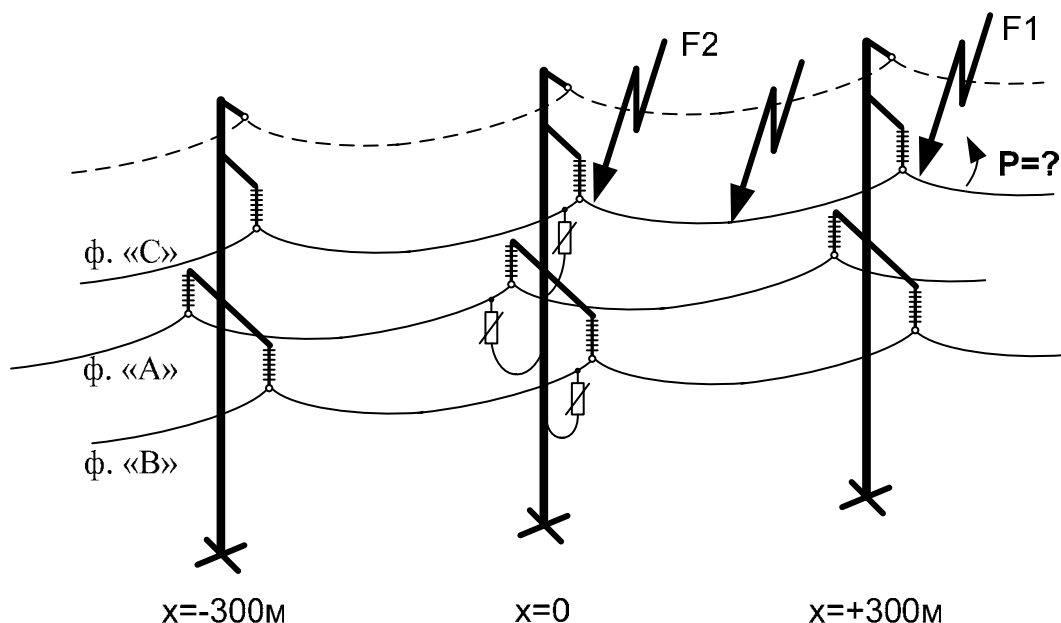


Рис.3.10. Одноцепная ВЛ с пролетом 300 м и комплектом ОПН на одной из опор.

Согласно рис.3.11 разряд молнии в фазный провод на расстоянии $x = 300$ метров от опоры с ОПН (точка F1) вне зависимости от величины сопротивления заземления R_3 с высокой вероятностью P сопровождается перекрытием изоляции ВЛ.

Даже при разряде молнии в точку F2 ($x = 0$, есть ОПН) вероятность P перекрытия изоляции незащищенной опоры сохраняется. С использованием рис.3.6,б это объясняется тем, что по фазному проводу в сторону незащищенной опоры распространяется волна $u_{ОПН} + L_{ТРАВ} \cdot di(t)/dt + R_3 \cdot i(t)$, максимальное значение которой в зависимости от величины $i_M(t)$ тока молнии и скорости его изменения $di_M(t)/dt$ может заметно превышать и остающееся

напряжение $u_{\text{ОПН}}$ на ОПН, и прочность гирлянды изоляторов незащищенной опоры ВЛ.

Об эффективности массовой установки ОПН на каждой второй опоре ВЛ можно судить по площади под кривыми вида рис.3.11. Такая площадь представляет собой среднюю вероятность перекрытия изоляции при разряде молнии в произвольную точку фазного провода, а результаты ее расчета представлены на рис.3.12 в зависимости от сопротивления заземления опор и длины пролета. Кривая №4 на рис.3.12 отвечает случаю $U_{\text{ост}} = \infty$, т.е. случаю отсутствия ОПН на линии.

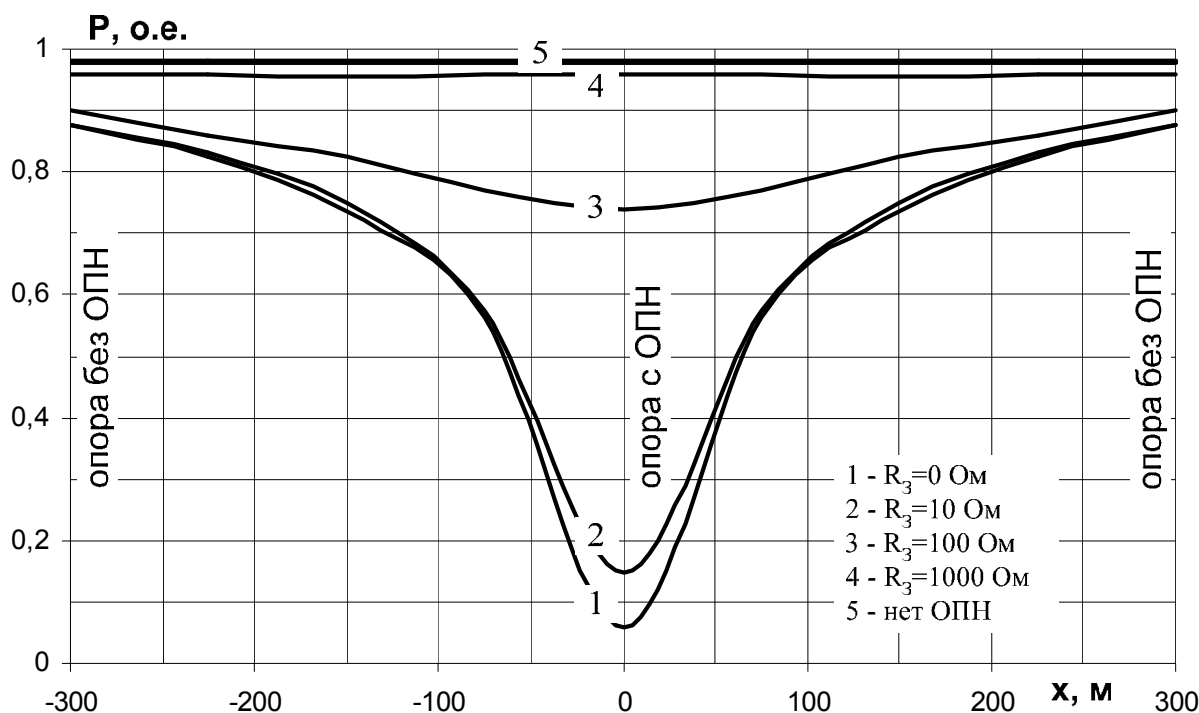


Рис.3.11. Вероятность перекрытия изоляции фазы «С» на незащищенной ОПН опоре в зависимости от координаты x разряда молнии в фазный провод «С» и сопротивления заземления R_3 опор (трос не установлен)

Анализ зависимостей рис.3.12, полученных в частном случае разряда молнии в фазный провод ВЛ 110 кВ без троса, позволяет сделать выводы, согласующиеся с мировым опытом, обзор которого дан в [11]:

- установка ОПН через опору является эффективной лишь для линий с малой длиной пролета; при типовых длинах пролета ВЛ 110 кВ, составляющих 200-300 метров, требуется установка ОПН на каждой опоре;
- для защиты изоляции линии не имеет особого смысла стремиться к использованию ОПН, имеющих пониженные остающиеся напряжения; в рамках заданного класса напряжения воздушной линии и класса ОПН конкретное значение остающегося напряжения ОПН не является фактором, серьезно влияющим на процессы при разрядах молнии в ВЛ.

Сделанные выводы во многом обусловлены конечной скоростью распространения электромагнитной волны вдоль ВЛ: даже самый совершенный

ОПН, обладающий минимальными остающимися напряжениями, физически не успеет повлиять на максимальные перенапряжения в месте разряда молнии, если он произошел на удалении в несколько сотен метров от ОПН. Вместе с тем, именно максимум напряжения на изоляции во многом определяет вероятность ее перекрытия.

Поскольку скорость волны конечна и для линий без троса, и для линий с тросом, и при разрядах в фазный провод, и при разрядах в опору или трос, то выводы, проиллюстрированные на примере частного случая разряда молнии в фазный провод ВЛ без троса, являются тем не менее общими:

- при защите всей трассы ВЛ установка ОПН требуется не реже, чем каждые 200-300 метров, т.е. на каждой опоре ВЛ 35-750 кВ или через каждые 2-3 опоры для ВЛ 6-10 кВ;
- при установке ОПН на отдельных опорах зона защиты ОПН ограничивается изоляцией этих опор.

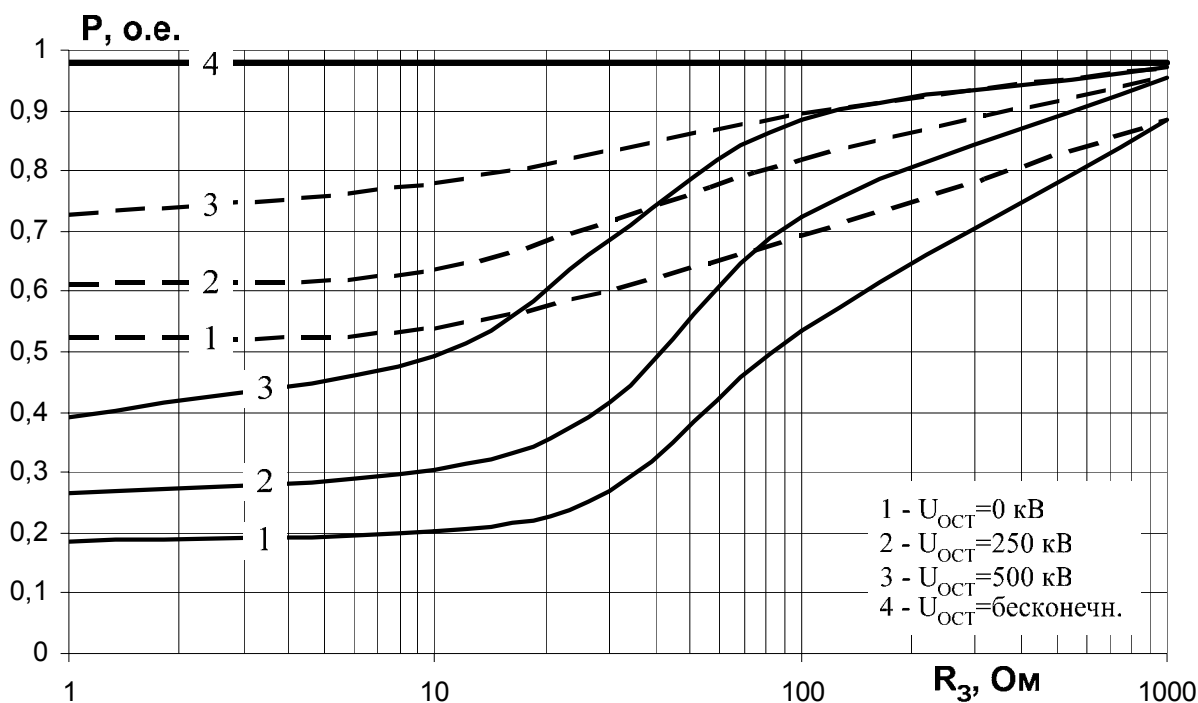


Рис.3.12. Вероятность перекрытия изоляции ВЛ без троса при разрядах молнии в фазный провод в зависимости от сопротивления заземления R_z опор и защитных характеристик ОПН, которые установлены на каждой второй опоре. Длина пролета 300 м (пунктирная линия) или 100 м (сплошная линия). Кривая №4 отвечает случаю отсутствия ОПН.

3.4. Обоснование мест первоочередной установки ОПН на опоре ВЛ

Для ВЛ 110 кВ без троса опасность представляют и разряды молнии в верхний фазный провод «С» и разряды в опору, которые по рис.3.5 (пунктир) сопровождаются перекрытиями, прежде всего, фаз «С» и «А». Поэтому для ВЛ без троса поэтапное повышение грозоупорности за счет установки ОПН на каждой опоре может быть организовано так:

- ОПН не установлены (кривая №1 на рис.3.13);
- установка ОПН в фазу «С» (кривая №2);
- установка ОПН в фазы «С» и «А» (кривая №3);
- установка ОПН в фазы «С», «А», «В» ($P = 0$ на рис.3.13).

Для ВЛ 110 кВ с тросом при типовых сопротивлениях заземления основную опасность представляют обратные перекрытия при разрядах молнии в трос, которые по рис.3.5 (сплошная линия) наиболее вероятны на нижние фазы «В» и «А». Поэтому для ВЛ с тросом поэтапное повышение грозоупорности за счет установки ОПН на каждой опоре может быть организовано так:

- ОПН не установлены (кривая №4 на рис.3.13);
- установка ОПН в фазу «В» (кривая №5);
- установка ОПН в фазы «В» и «А» (кривая №6);
- установка ОПН в фазы «В», «А», «С» ($P = 0$ на рис.3.13).

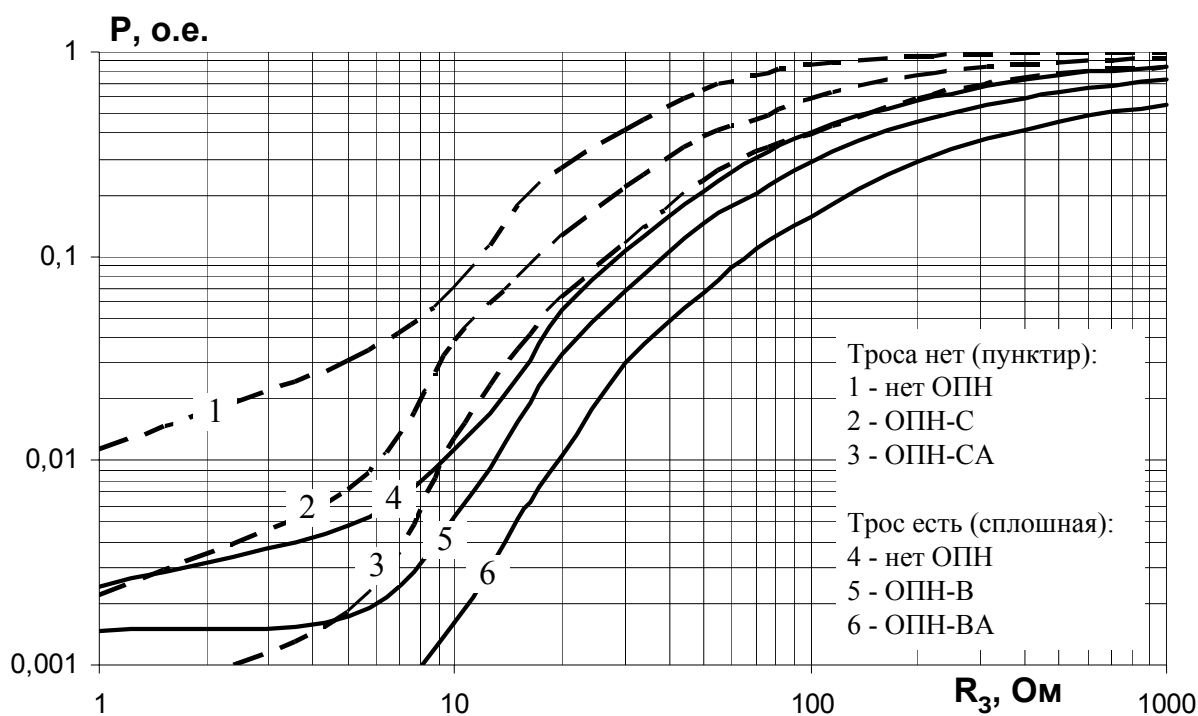


Рис.3.13. Вероятность перекрытия изоляции ВЛ в зависимости от сопротивления заземления R_z опор и фаз установки ОПН на каждой опоре: пунктирная линия – при разрядах молнии в опору линии без троса; сплошная линия – при разрядах молнии в трос линии с тросом.

Статистические данные по молнии таковы, что в области больших токов молнии вероятность появления токов еще большей величины резко снижается. Поэтому при разрядах в заземленные части ВЛ уменьшение сопротивления заземления опор по рис.3.13 делает эффективность установки одной или двух фаз ОПН все более ощутимой, особенно для линий с тросовой защитой.

Поскольку грозовые отключения ВЛ 110 кВ вызваны не только разрядами молнии в ее заземленные части (рис.3.13), но и разрядами в фазные провода, то для получения окончательного заключения об эффективности той или иной схемы размещения ОПН на опоре требуется расчет числа отключений ВЛ с учетом всех возможных мест разряда молнии.

3.5. Число отключений ВЛ до и после установки ОПН

Годовое число разрядов молнии в ВЛ 110 кВ зависит от многих факторов, но, прежде всего, от протяженности ВЛ и грозовой активности. С точки зрения грозowych перенапряжений для изоляции ВЛ 110 кВ основную опасность представляют прямые разряды молнии в ВЛ [2] (в фазный провод, в опору, в трос). Среднее соотношение числа разрядов в различные элементы ВЛ 110 кВ, определенное по различным существующим отечественным и зарубежным методикам [2,3 и др.], приведено ранее в табл.1.3.

Упрощенно будем считать, что каждое импульсное перекрытие изоляции ВЛ 110 кВ в сетях с заземленной нейтралью переходит в силовое короткое замыкание (ряд методик называют вероятностью установления силовой дуги несколько менее 1). Тогда число отключений ВЛ, вызванных грозowymi перенапряжениями, составит:

$$N_{ВЛ} = (D_{\phi} \cdot P_{\phi} + D_O \cdot P_O + D_T \cdot P_T) \cdot n \cdot \frac{L_{ВЛ}}{100} \cdot \frac{T_q}{100}, \quad (3.4)$$

где P_{ϕ} , P_O , P_T – вероятности (о.е.) перекрытия изоляции ВЛ соответственно при разрядах молнии в фазу, в опору (или в трос вблизи от опоры), в трос в средней части пролета; n – удельное число разрядов молнии в ВЛ, определенное по методикам [2,3 и др.], составляющее в среднем $n=100$ раз на каждые 100 км длины ВЛ и 100 грозowych часов; $L_{ВЛ}$ – длина ВЛ (км); T_q – число грозowych часов [2] в году в районе расположения ВЛ.

Для оценки по (3.4) конкретного числа отключений одноцепной ВЛ 110 кВ необходимы:

- величина $P = P_{\phi}$;
- величина $P = P_O$, представляющая собой вероятность перекрытия изоляции при разрядах молнии в опору; она дана на рис.3.13 (пунктирные линии);
- величина $P = D_O \cdot P_O + D_T \cdot P_T$, представляющая собой среднюю вероятность перекрытия изоляции при разрядах молнии в различные участки троса; она дана на рис.3.13 (сплошные линии).

В случае разрядов молнии в фазные провода ВЛ 110 кВ (скорее всего в верхнюю фазу «С») вероятность P_{ϕ} перекрытия изоляции пораженной фазы можно принять:

- равной $P_{\phi} \approx 1$ при отсутствии ОПН фазы «С» (см. кривую №4 на рис.3.11);
- равной $P_{\phi} = 0$ при наличии на каждой опоре ОПН в фазе «С».

В табл.3.3 приведены результаты вычислений по (3.4) годового числа грозowych отключений ВЛ 110 кВ, пока не имеющих установленных ОПН. Здесь и далее расчеты выполнены для $L_{ВЛ} = 100$ км и $T_q = 100$ часов, но при необходимости могут быть пропорционально пересчитаны на любую другую длину и интенсивность грозовой деятельности.

Данные из табл.3.3 позволяют еще раз отметить, что в рамках заданного класса изоляции ВЛ уменьшение сопротивления заземления опор и установка молниезащитных тросов являются весьма эффективными средствами снижения числа грозowych отключений ВЛ.

Таблица 3.3,а. Оценка числа грозových отключений одноцепной ВЛ 110 кВ без троса.

R_3 , Ом	D_ϕ	P_ϕ	D_o	P_o *)	$N_{опн}$, на 100 км и 100 час
1	0,5	1,0	0,5	0,0114	50,6
5	0,5	1,0	0,5	0,0306	51,5
10	0,5	1,0	0,5	0,0696	53,5
15	0,5	1,0	0,5	0,1764	58,8
20	0,5	1,0	0,5	0,2670	63,4
30	0,5	1,0	0,5	0,4172	70,9
50	0,5	1,0	0,5	0,6466	82,3
70	0,5	1,0	0,5	0,7746	88,7
100	0,5	1,0	0,5	0,8574	92,9
200	0,5	1,0	0,5	0,9604	98,0
500	0,5	1,0	0,5	0,9952	99,8
1000	0,5	1,0	0,5	0,9992	100,0

*) значение по рис.3.7 (пунктирная кривая 2) или по рис.3.13 (пунктирная кривая 1)

Таблица 3.3,б. Оценка числа грозových отключений одноцепной ВЛ 110 кВ с тросом.

R_3 , Ом	D_ϕ	P_ϕ	$(D_o \cdot P_o + D_T \cdot P_T)$ *)	$N_{опн}$, на 100 км и 100 час
1	0,005	1,0	0,0024	0,7
5	0,005	1,0	0,0049	1,0
10	0,005	1,0	0,0113	1,6
15	0,005	1,0	0,0255	3,1
20	0,005	1,0	0,0543	5,9
30	0,005	1,0	0,1077	11,3
50	0,005	1,0	0,2063	21,1
70	0,005	1,0	0,3007	30,6
100	0,005	1,0	0,4003	40,5
200	0,005	1,0	0,5797	58,5
500	0,005	1,0	0,7647	77,0
1000	0,005	1,0	0,8527	85,8

*) значение по рис.3.7 (сплошная кривая 2) или по рис.3.13 (сплошная кривая 4)

Техническую целесообразность установки на каждой опоре того или иного числа ОПН можно оценить с использованием табл.3.4, при заполнении которой для удобства выбраны лишь несколько сопротивлений заземления: 10, 30 и 100 Ом.

Анализ табл.3.4 приводит к следующим выводам:

- для ВЛ без троса установка всего одного ОПН на каждой опоре (в верхнюю фазу) дает очень серьезное снижение числа грозových отключений;
- для ВЛ без троса установка всего одного ОПН на каждой опоре (в верхнюю фазу) позволяет снизить число грозových отключений до уровня, который имеет место для ВЛ с тросом, не оснащенной ОПН;
- для ВЛ с тросом установка 1-2 фаз ОПН на каждой опоре (в нижние фазы) не дает серьезного снижения числа грозových отключений и, поэтому, для линий с тросом всегда следует склоняться к установке ОПН одновременно во все фазы каждой опоры.

При использовании ОПН существует риск выхода его из строя, и, следовательно, данные, приведенные в табл.3.4, надо дополнить оценками числа повреждений ОПН. В эксплуатации разрушение ОПН вызывается или его некачественным изготовлением, или нерасчетными токовыми и энергетическими воздействиями. Для современных ОПН ведущих отечественных и зарубежных предприятий риск повреждения из-за некачественного изготовления всегда оказывается существенно меньше, чем риск повреждения из-за нерасчетных воздействий. В качестве одного из вероятных нерасчетных воздействий выступает разряд мощной молнии в фазный провод рядом с ОПН. Риск повреждения ОПН в таком случае зависит от его характеристик и будет определен далее.

Табл.3.4,а. Оценка эффективности размещения ОПН на каждой опоре ВЛ 110 кВ без троса.

R_3 , Ом	ОПН	D_ϕ	P_ϕ	D_O	P_O *)	$N_{ВЛ}$, на 100 км и 100 час
10	нет	0,5	1,0	0,5	0,0696	53,5
	С	0,5	0	0,5	0,0305	1,5
	СА	0,5	0	0,5	0,0128	0,6
	САВ	0,5	0	0,5	0	0
30	нет	0,5	1,0	0,5	0,4172	70,9
	С	0,5	0	0,5	0,2178	10,9
	СА	0,5	0	0,5	0,1156	5,8
	САВ	0,5	0	0,5	0	0
100	нет	0,5	1,0	0,5	0,8574	92,9
	С	0,5	0	0,5	0,5962	29,8
	СА	0,5	0	0,5	0,3988	19,9
	САВ	0,5	0	0,5	0	0

*) значение по рис.3.13

Табл.3.4,б. Оценка эффективности размещения ОПН на каждой опоре ВЛ 110 кВ с тросом.

R_3 , Ом	ОПН	D_ϕ	P_ϕ	$(D_O \cdot P_O + D_T \cdot P_T)$ *)	$N_{ВЛ}$, на 100 км и 100 час
10	нет	0,005	1,0	0,0113	1,6
	В	0,005	0	0,0050	1,0
	ВА	0,005	0	0,0016	0,7
	ВАС	0,005	0	0	0
30	нет	0,005	1,0	0,1077	11,3
	В	0,005	0	0,0664	7,1
	ВА	0,005	0	0,0282	3,3
	ВАС	0,005	0	0	0
100	нет	0,005	1,0	0,4003	40,5
	В	0,005	0	0,2910	29,6
	ВА	0,005	0	0,1662	17,1
	ВАС	0,005	0	0	0

*) значение по рис.3.13

3.6. Токовые и энергетические нагрузки на ОПН

3.6.1. Выбор числа моделируемых опор на примере ВЛ без троса

При расчете числа перекрытий изоляции ВЛ 110 кВ было показано, что на факт перекрытия изоляции не всегда успевают повлиять даже те ОПН и опоры, которые расположены на расстоянии всего 200-300 метров от места разряда молнии в ВЛ. Поэтому при определении числа перекрытий изоляции достаточно подробно моделировать лишь 2-3 опоры. А какое число опор можно считать приемлемым при оценке токовых и энергетических нагрузок на ОПН?

Ответ на поставленный вопрос зависит от наличия у подвесных ОПН внешнего искрового промежутка: на практике срабатывают искровые промежутки тех ОПН, которые оказались ближе всего к месту разряда молнии, что затрудняет надежное срабатывание искровых промежутков более удаленных ОПН. Таким образом, при оценках токовых и энергетических нагрузок на ОПН с искровыми промежутками нет необходимости в моделировании числа опор, большего чем 2-3.

Поскольку ОПН без искровых промежутков обладают рядом ранее названных преимуществ, то именно они станут основным типом применяемых на ВЛ защитных аппаратов, а значит требуется получить и детально обосновать ответ на вопрос о достаточном числе моделируемых опор с ОПН такого типа.

Рассмотрим закономерности при разряде молнии в фазный провод (рис.3.14) и при разряде молнии в опору (рис.3.15). Жирные стрелочки на схемах показывают направления, по которым пройдут наибольшие по величине и длительности импульсные токи, а тонкие – остальные пути для тока.

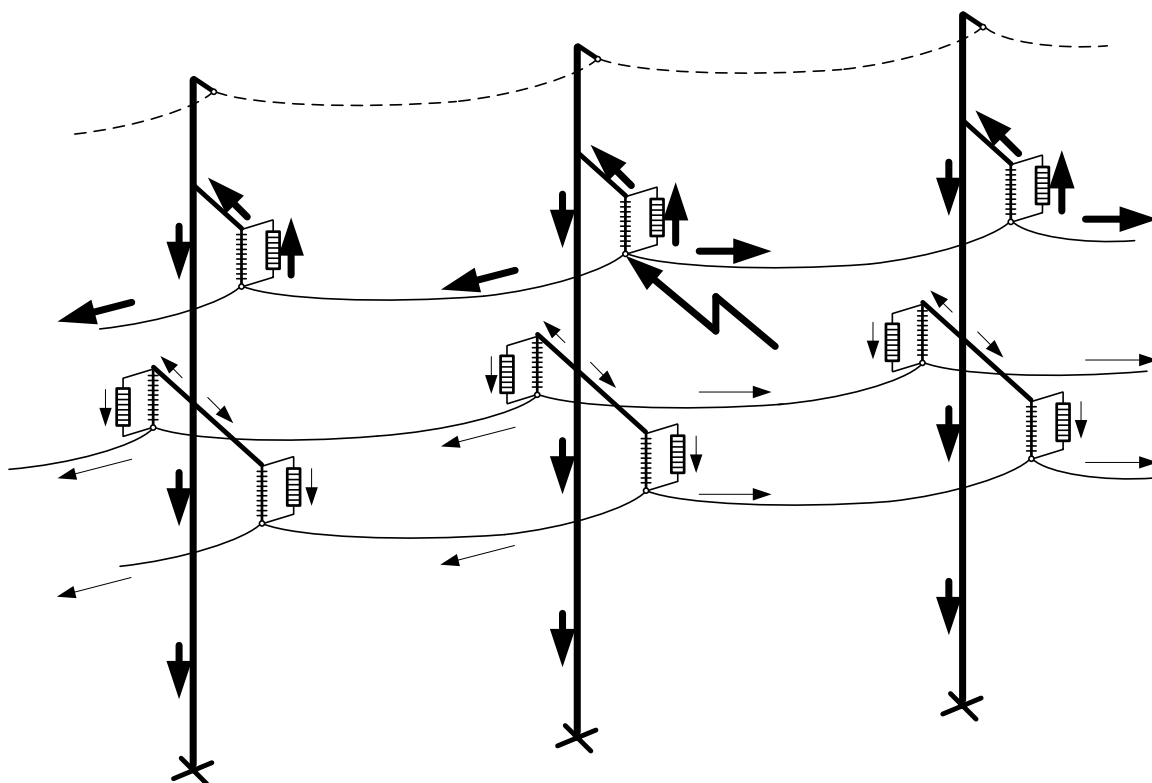


Рис.3.14. Растекание тока молнии при разряде молнии в фазный провод ВЛ без троса.

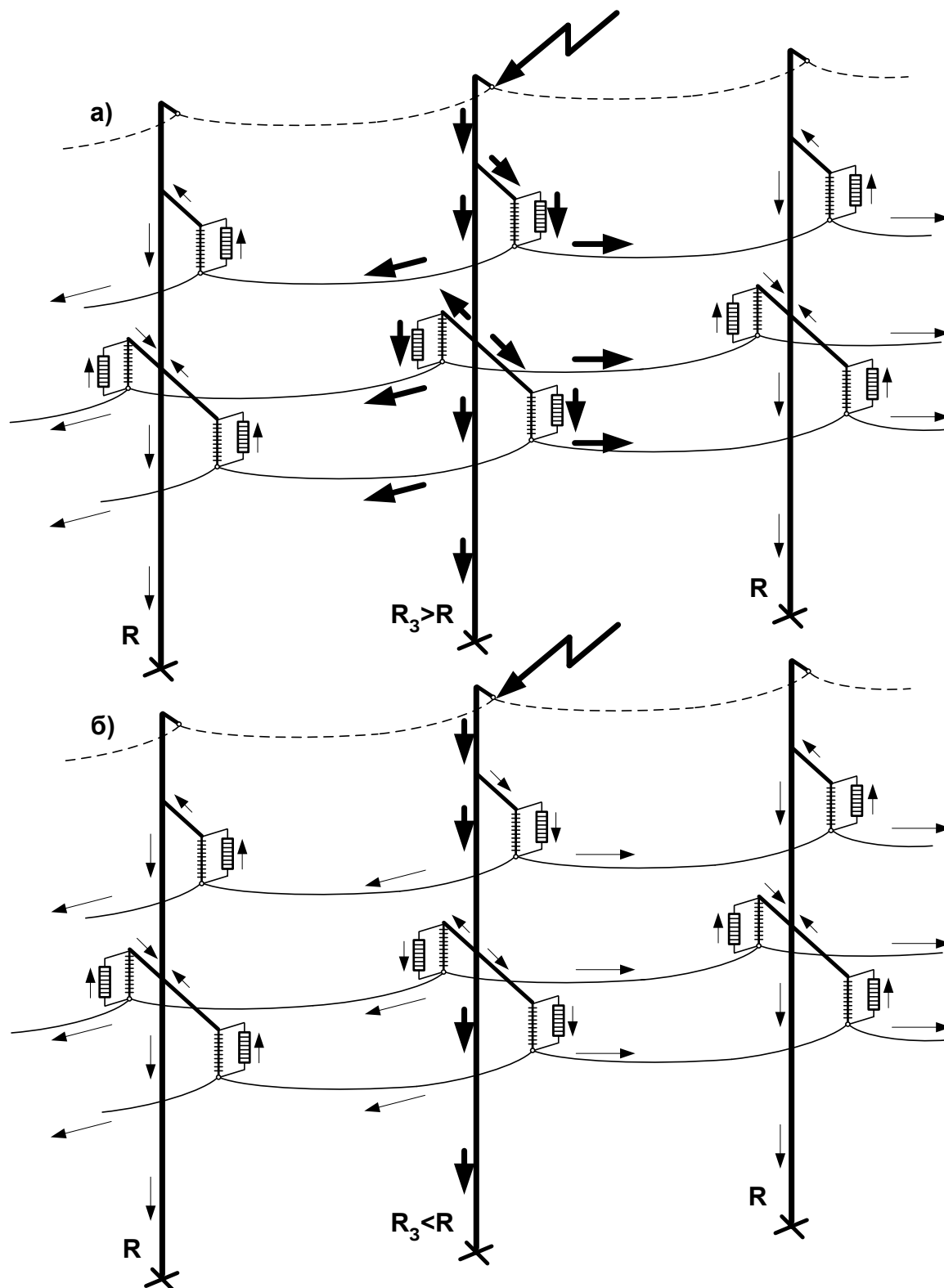


Рис.3.15 Растекание тока молнии при разряде молнии в опору ВЛ без троса: при относительно малых сопротивлениях пораженной опоры (а) и при относительно больших (б).

При разряде молнии в фазный провод согласно рис.3.14 получается, что в отведении тока молнии в землю участвуют несколько ОПН пораженной фазы, включенные параллельно. Следовательно, чем большее число опор с ОПН моделируется, тем меньшие энергетические воздействия будут на каждый из аппаратов – это видно по рис.3.16,а. Наибольшая энергия выделится в том ОПН

пораженной фазы, который оказался ближе всего к месту разряда молнии, поскольку такой ОПН участвовал в отведении тока молнии с самого начала. В тех ОПН, которые расположены все дальше от места разряда молнии, будет выделяться все меньшая энергия, поскольку такие ОПН из-за конечной скорости распространения волны вступают в работу по отведению тока молнии все с большим опозданием. Анализ рис.3.16,а показывает, что при разрядах молнии в фазный провод для получения близких к реальности энергий в ОПН необходимо моделировать 7-9 опор (дальнейшее усложнение расчетной модели лишь незначительно изменит получаемые энергии).

При прохождении импульсных токов ОПН нагревается, а степень его нагрева определяется энергией, которая в нем выделилась. Вместе с тем, известны повреждения ОПН не только из-за недопустимо большой выделяемой энергии (нелинейные элементы прогорают), но и по причине большой величины импульсного тока (нелинейные элементы перекрываются по поверхности). Поэтому определенный интерес представляет не только энергия, но и максимальное значение (амплитуда) импульсного тока – рис.3.16,б. Видно, что максимальное значение импульсного тока в ОПН слабо зависит от числа учтенных опор, ровно как от числа опор слабо зависят максимальные перенапряжения на изоляции, определяющие факт ее перекрытия.

При разряде молнии в опору в отведении тока молнии в землю участвуют несколько ОПН пораженной опоры (рис.15,а), работающие параллельно ее заземляющему устройству. Таким образом, первый путь для тока – через заземляющее устройство пораженной опоры (путь «земля»), а второй – через три ОПН пораженной опоры в фазные провода, откуда через ОПН соседних опор в заземляющие устройства их опор (путь «ОПН-фаза-ОПН-земля»).

Если у пораженной опоры сопротивление заземления равно или больше, чем у соседних (рис.3.15,а), то ток молнии пойдет и по пути «земля», и по пути «ОПН-фаза-ОПН-земля». Ток в ОПН пораженной опоры окажется тем больше, чем ниже эквивалентное сопротивление заземления соседних опор, т.е. чем большее их число моделируется. Именно поэтому на рис.3.17 с ростом числа моделируемых опор возрастают выделяющаяся энергия и максимальное значение тока в ОПН пораженной опоры.

Если у пораженной опоры сопротивление заземления меньше, чем у соседних (рис.3.15,б), то практически весь ток молнии уйдет в землю через заземляющее устройство пораженной опоры – току нет смысла через ОПН уходить в фазные провода к заземляющим устройствам соседних опор. Таким образом, при малых сопротивлениях заземления энергия в ОПН мала, а ее величина, во-первых, не является основой для выбора ОПН, а во-вторых – слабо зависит от числа моделируемых опор.

Из рис.3.17,а, полученного при сопротивлении заземления каждой опоры $R_3 = 30$ Ом, следует, что с точки зрения энергии ОПН достаточным было бы моделировать, скажем, 5 опор. Не приведенные здесь расчеты показали, что для более высоких $R_3 > 30$ Ом участие соседних опор в отведении тока молнии усиливается, однако достаточно моделировать лишь 7-9 опор, а дальнейшее

усложнение расчетной модели лишь незначительно изменит получаемые энергии.

Согласно рис.3.17,б максимальное значение импульсного тока в ОПН слабо зависит от числа учтенных опор, ровно как от числа опор слабо зависят максимальные перенапряжения на изоляции, определяющие факт ее перекрытия.

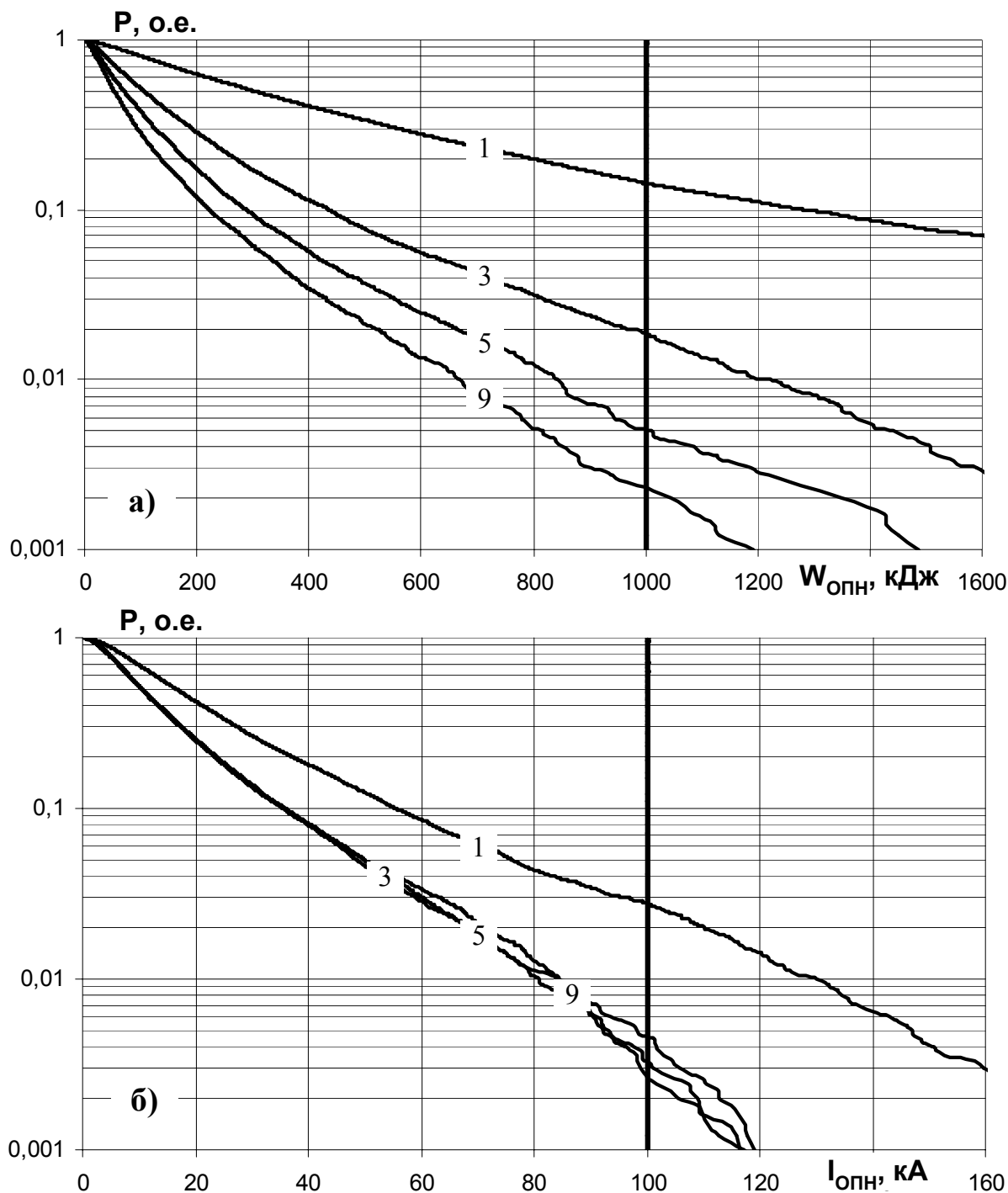


Рис.3.16. Энергия (а) и максимальное значение тока (б) в наиболее нагруженном ОПН при разряде молнии в фазу одноцепной ВЛ 110 кВ без троса в зависимости от числа моделируемых опор: 1, 3, 5, 9. Рассмотрен случай: $R_3 = 30$ Ом, три ОПН на каждой опоре.

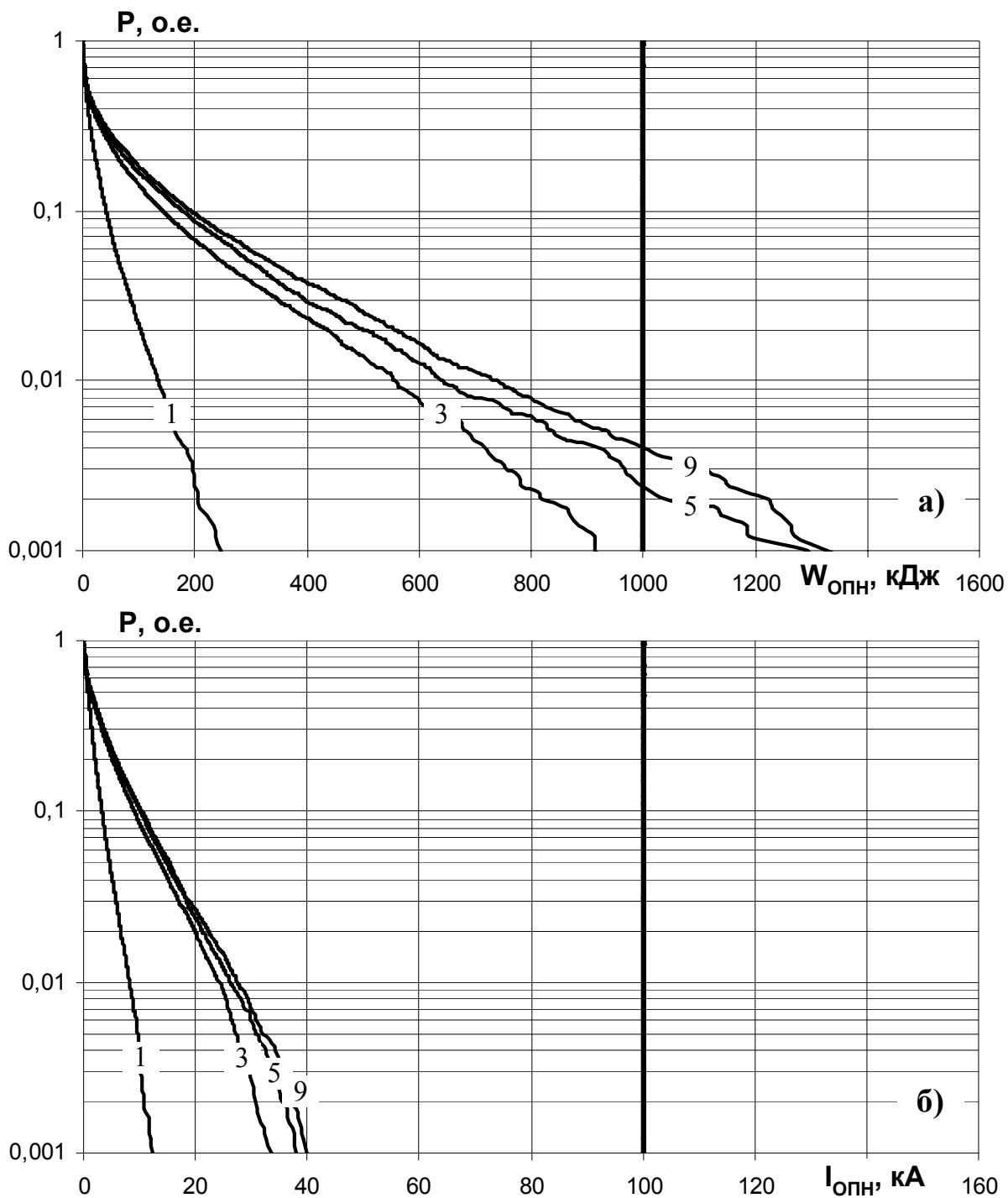


Рис.3.17. Энергия (а) и максимальное значение тока (б) в наиболее нагруженном ОПН при разряде молнии в опору одноцепной ВЛ 110 кВ без троса в зависимости от числа моделируемых опор: 1, 3, 5, 9. Рассмотрен случай: $R_3 = 30$ Ом, три ОПН на каждой опоре.

3.6.2. Расчет токовых и энергетических нагрузок на ОПН

Широко используемое рядом специалистов моделирование 3-х опор является достаточным для определения числа перекрытий изоляции ВЛ, поскольку они происходят в первые микросекунды после разряда молнии, однако для оценок энергии в ОПН необходимо моделировать гораздо большее число опор, так как энергия рассеивается в течение десятков микросекунд (именно такова длительность тока молнии), за которые в работу по рассеиванию энергии успеют вступить многие ОПН, установленные на ВЛ безыскровым способом.

В зависимости от места прямого разряда молнии в ВЛ результаты статистических расчетов энергетических и токовых воздействий на наиболее нагруженный ОПН представлены на рис.3.18-3.20, при получении которых подробно моделировались 9 опор. На каждом из рисунков даны четыре кривые, отвечающие сопротивлению заземления опор $R_3 = 10, 30, 100, 1000$ Ом, для пояснения влияния которого удобно пользоваться представленными ранее схемами растекания тока молнии рис.3.14-3.15.

При разряде молнии в фазный провод согласно рис.3.18,а выделяющаяся в ОПН энергия практически не зависит от сопротивления заземления: молния, задаваемая источником тока, вне зависимости от сопротивления заземления вынуждена через пораженный фазный провод и ОПН уходить в заземляющие устройства опор. Лишь при малом сопротивлении заземления опор $R_3 = 10$ Ом молния довольствуется ближайшим установленным ОПН и заземляющим устройством его опоры, обуславливая повышенные энергетические нагрузки на этот ОПН. При $R_3 > 10$ Ом ток молнии стекает с фазного провода в землю уже через многие ОПН пораженной фазы, что приводит к снижению тока и энергии в наиболее нагруженном ОПН.

Максимальное значение тока в ОПН достигается в первые микросекунды после попадания молнии в фазный провод и, следовательно, на его величину успевают повлиять лишь сопротивление заземления ближайшей опоры. Чем меньше R_3 , тем больше максимальное значение тока в ОПН ближайшей опоры и меньше токи в других присоединенных к фазному проводу ОПН. Наибольшее возможное значение тока в ОПН ближайшей опоры может быть сопоставимо с максимальным значением тока молнии, достигая десятков кА (рис.3.18,б).

При разряде молнии в опору линии без троса согласно рис.3.19 и энергия, и максимальное значение тока в ОПН существенно зависят от сопротивления заземления опор. Объяснение простое: три присоединенных к опоре ОПН работают параллельно ее заземляющему устройству. Ток молнии делится между ее заземляющим устройством и тремя присоединенными ОПН – поэтому даже при $R_3 \rightarrow \infty$ максимальное значение тока в ОПН не превзойдет трети максимального значения тока молнии, т.е. будет заметно меньше, чем при разряде молнии в фазный провод.

Поскольку при разряде молнии в опору ВЛ без троса энергия делится примерно поровну между тремя присоединенными ОПН, а при разряде молнии в фазный провод энергия выделяется во многих ОПН пораженной опоры, то

энергия наиболее нагруженного ОПН при разряде в опору (рис.3.19,а) может превосходить таковую при разряде в фазу (рис.3.18,а).

При разряде молнии в трос согласно рис.3.20 и энергия, и максимальное значение тока в ОПН существенно зависят от сопротивления заземления опор. Как и для разряда в опору объяснение простое: три присоединенных к опоре ОПН работают параллельно ее заземляющему устройству. За счет наличия троса часть тока молнии отводится к заземляющим устройствам соседних опор, что заметно снижает энергию и ток в ОПН по сравнению со случаем без троса (достаточно сравнить рис.3.19 и рис.3.20).

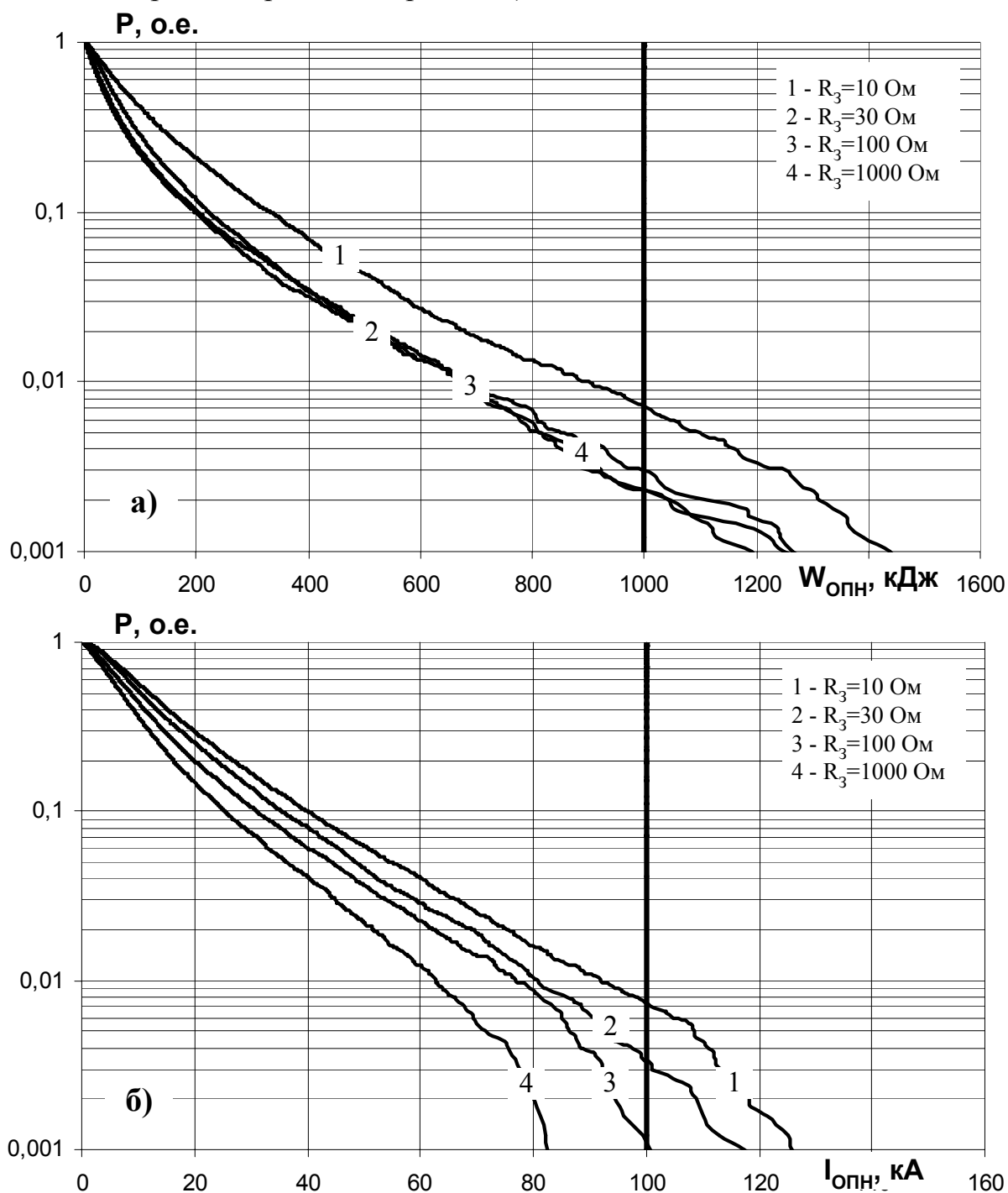


Рис.3.18. Энергия, выделяющаяся в наиболее нагруженном ОПН при разряде молнии в фазный провод одноцепной ВЛ 110 кВ без троса (три ОПН на каждой опоре).

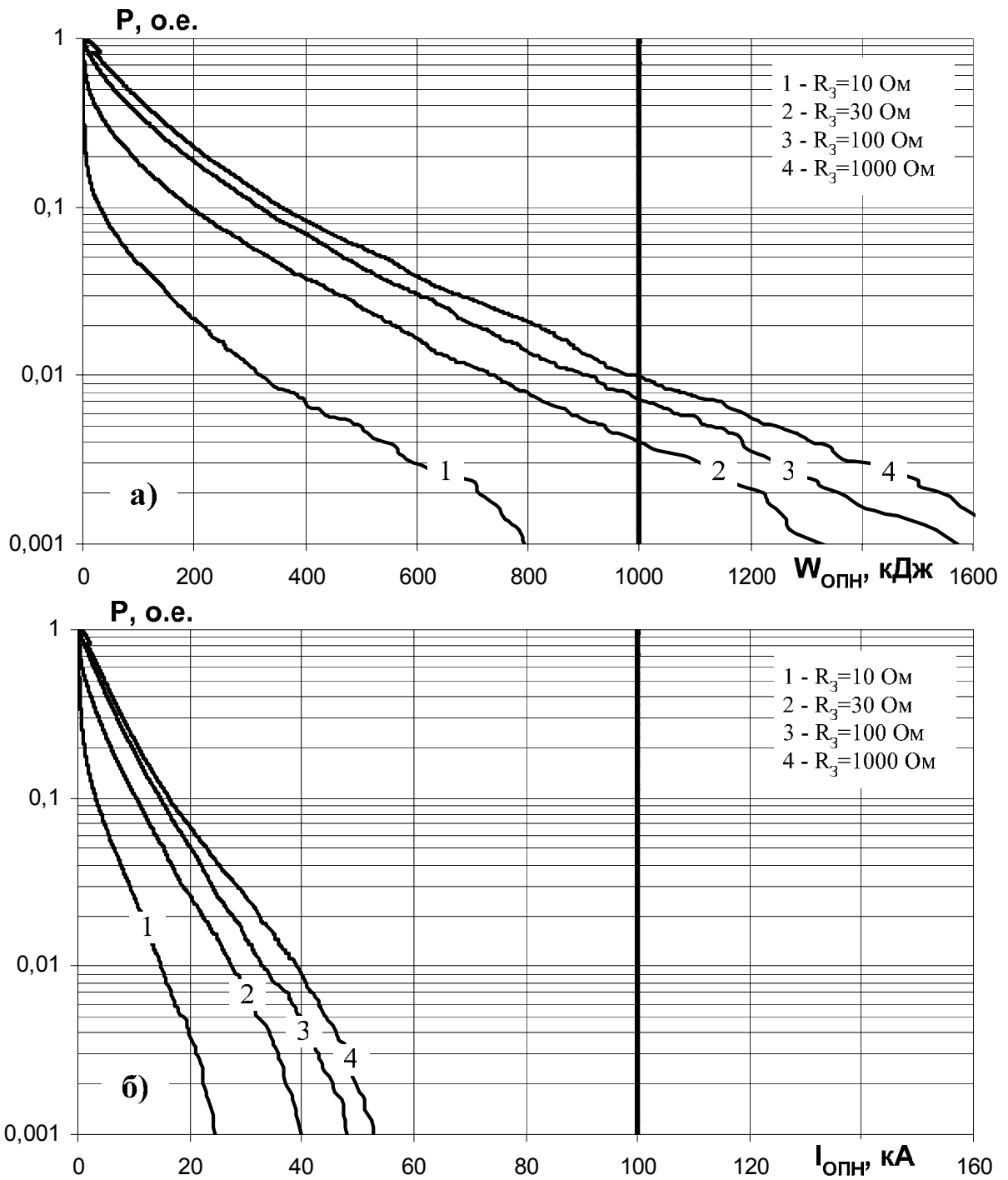


Рис.3.19. Энергия, выделяющаяся в наиболее нагруженном ОПН при разряде молнии в опору одноцепной ВЛ 110 кВ без троса (три ОПН на каждой опоре).

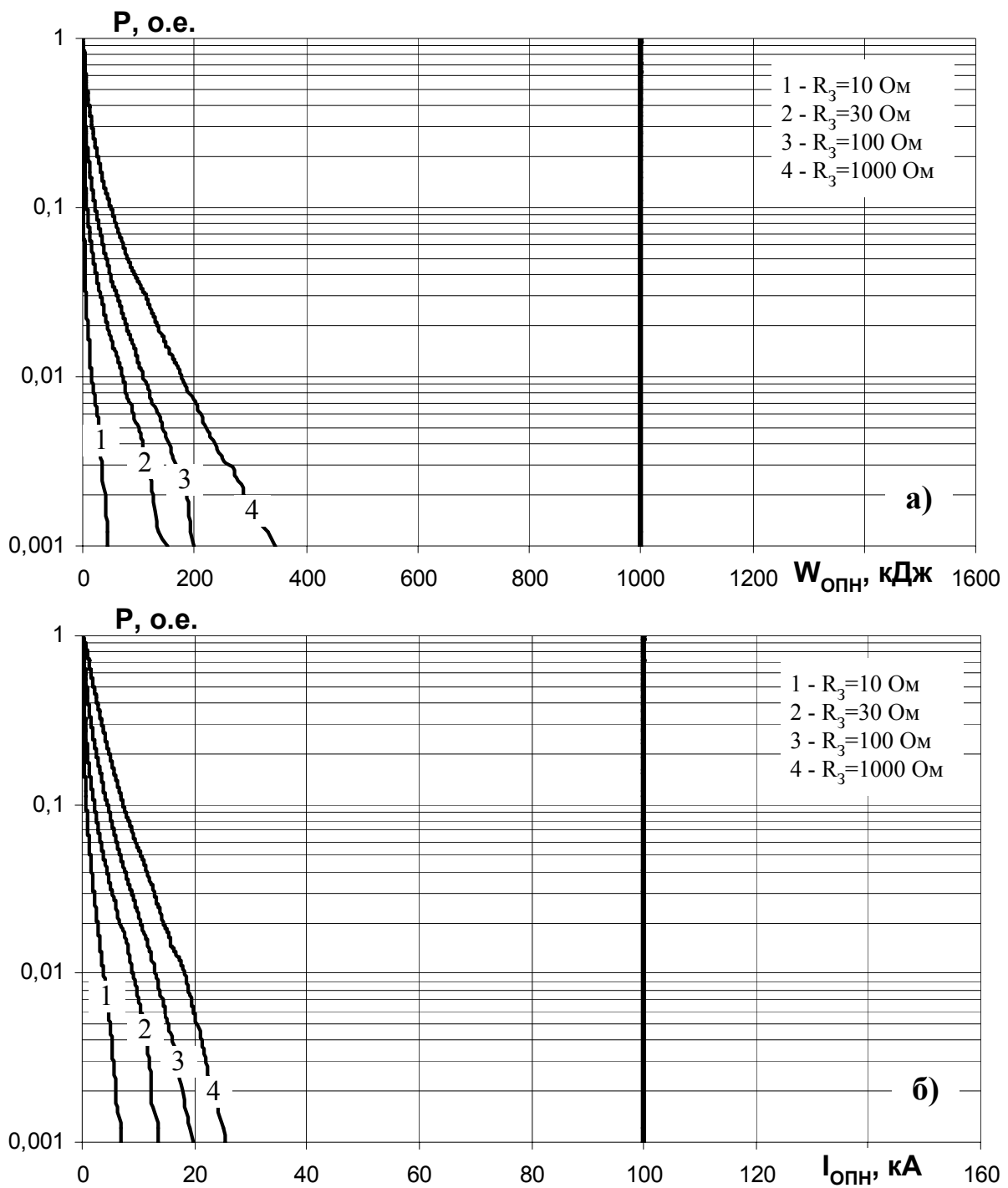


Рис.3.20. Энергия, выделяющаяся в наиболее нагруженном ОПН при разряде молнии в трос одноцепной ВЛ 110 кВ (три ОПН на каждой опоре).

Индуктированные грозовые перенапряжения при разрядах молнии рядом с ВЛ должны учитываться при оценках числа перекрытий изоляции ВЛ 6-10 кВ и могут не рассматриваться для ВЛ 35-750 кВ. Однако при оценках токовых и энергетических нагрузок на подвесные ОПН, а также при оценках риска повреждения ОПН, и для ВЛ 6-10 кВ, и для ВЛ 35-750 кВ индуктированные перенапряжения могут быть опущены как неопасные.

3.7. Выбор характеристик ОПН и оценка риска его повреждения

Если на каждой опоре ВЛ во всех фазах установлены ОПН, то грозовые перекрытия изоляции ВЛ исключены при любом R_3 и любом числе тросов (0,1,2...), однако два этих фактора серьезно влияют на ток и энергию в ОПН, определяя риск повреждения установленных аппаратов, который следует учитывать при выборе основных характеристик ОПН.

В [30] показано, что основными характеристиками ОПН, связанными со свойствами его нелинейных элементов, являются:

- наибольшее рабочее напряжение $U_{НРО}$;
- удельная поглощаемая энергия $W_{уд}$.

Еще одним немаловажным параметром является «импульс большого тока» $I_{4/10}$ (форма 4/10 мкс), поскольку он отражает способность ОПН пропускать значительные по величине импульсные токи.

Наибольшее рабочее напряжение $U_{НРО}$ определяет:

- надежность работы ОПН в нормальном режиме и при квазистационарных перенапряжениях (чем больше $U_{НРО}$ – тем лучше);
- уровень остающегося напряжения ОПН при ограничении грозовых и коммутационных перенапряжений (чем меньше $U_{НРО}$ – тем лучше).

Поскольку, как было показано, в рамках заданного класса напряжения ОПН конкретное значение остающегося напряжения слабо влияет на число грозовых отключений ВЛ, то из двух перечисленных факторов основное внимание надо уделять первому, т.е. заниматься повышением надежности работы ОПН. Рекомендации по $U_{НРО}$ сведены в табл.3.5.

Импульс большого тока $I_{4/10}$ для ВЛ всех классов напряжения следует принимать максимально возможным – в настоящее время это 100 кА. Такое значение в виде жирной вертикальной черты нанесено на всех приведенных ранее рисунках, касающихся токовых воздействий на ОПН. Выбор $I_{4/10} = 100$ кА имеет целью повысить надежность работы ОПН, прежде всего, при прямых разрядах молнии в фазные провода ВЛ.

Табл.3.5. Рекомендуемые значения $U_{НРО}$ и $I_{4/10}$, призванные повысить надежность ОПН.

$U_{НОМ}$, кВ	6	10	35	110	220	330	500	750
$U_{НРО}$, кВ	7.6	12.7	42.5	88	176	230	333	500
$I_{4/10}$, кА	100	100	100	100	100	100	100	100

Удельная энергия. К сожалению, способность ОПН поглощать энергию W при грозовых импульсных токах (величиной в десятки килоампер и длительностью в десятки микросекунд) специальными испытаниями не проверяется. Косвенно W можно оценить на основе рабочих испытаний ОПН второго и более высоких классов пропускной способности [29], в рамках которых на ОПН в совокупности с напряжением промышленной частоты

воздействуют $N = 2$ импульсных тока прямоугольной формы длительностью $T = 2000$ мкс и величины I_{Π}

$$W = N \cdot \int_i u(t) \cdot i(t) \cdot dt = N \cdot \left\{ \sqrt{2} \cdot U_{\text{нрО}} \right\} \cdot K \cdot I_{\Pi} \cdot T,$$

где $K \approx 2$ – кратность ограничения перенапряжений [30].

Удельной энергией N импульсов тока называется величина энергии, приведенная к наибольшему рабочему напряжению ОПН:

$$W_{\text{уд}} = \frac{W}{U_{\text{нрО}}} = N \cdot \sqrt{2} \cdot K \cdot I_{\Pi} \cdot T.$$

Для ОПН 110 кВ, имеющего наибольшее рабочее напряжение $U_{\text{нрО}} = 88$ кВ и ток пропускной способности $I_{\Pi} = 1000$ А, допустимую энергию можно оценить как $W \approx 1000$ кДж. Такое значение в виде жирной вертикальной черты нанесено на всех приведенных ранее рисунках, касающихся энергетических воздействий на ОПН.

Анализ рис.3.18-3.20 показывает, что при разрядах молнии в фазные провода и опоры (ВЛ без троса) энергия в наиболее нагруженном ОПН 110 кВ может заметно превосходить уровень 1000 кДж, т.е. всегда существует риск повреждения установленных ОПН.

Риск повреждения ОПН зависит:

- от удельной энергии ОПН $W_{\text{уд}}$ (или от энергии W);
- от наличия у ОПН внешнего искрового промежутка;
- от сопротивления заземления опор;
- от наличия троса;
- от числа фаз, в которые на опоре установлены ОПН;
- от числа опор с ОПН.

Для рис.3.18-3.20 рассматривались три ОПН без искрового промежутка, установленные на каждой опоре ВЛ – самый благоприятный случай с точки зрения воздействий на ОПН. Значение вероятности P , которое на этих рисунках соответствует пересечению кривых с уровнем $W \approx 1000$ кДж, позволяет судить о вероятности повреждения ОПН при разрядах молнии в фазные провода, опоры, тросы. Далее по формуле (3.4) с использованием найденных P несложно дать оценку $N_{\text{опн}}$ – годового числа повреждений ОПН (на 100 км длины ВЛ и 100 грозových часов).

В случае, когда ОПН установлены или не в каждой фазе, или не на каждой опоре (но с какой-то периодичностью – через одну опоры, через две опоры и т.п.) следует провести аналогичные рис.3.18-3.20 расчеты и далее получить $N_{\text{опн}}$.

В случае, когда ОПН установлены лишь на нескольких опорах вдоль трассы ВЛ, получить оценку $N_{\text{опн}}$ не представляется возможным, поскольку она пропорциональна числу разрядов молнии в линию вблизи от рассматриваемого ОПН и его опоры, а это число, зависящее от большого числа сложно учитываемых факторов, назвать затруднительно. Доверять можно лишь усредненным по трассе линии оценкам числа разрядов молнии.

Результаты обработки рис.3.18-3.20 содержатся в табл.3.6, откуда видно, что годовое число повреждений ОПН существенно снижается с ростом допустимых энергетических воздействий на ОПН (с ростом его удельной энергии $W_{уд}$ или пропорциональной ей величины – тока пропускной способности $I_{п}$). Повреждение ОПН вызывает короткое замыкание на ВЛ и требует ее отключения с последующим запуском цикла АПВ, успешность которого зависит от факта наличия универсального отделителя УО.

Если ВЛ защищена при помощи сравнительно «легких» ОПН с током пропускной способности $I_{п} = 500$ А, то частота повреждений ОПН в расчете на 100 км длины ВЛ и 100 грозовых часов частота составит:

- для ВЛ без троса $N_{опн} \approx 3$ в год (три ОПН за год);
- для ВЛ с тросом $N_{опн} \approx 0.01 \div 0.02$ в год (один ОПН за 50-100 лет).

Учитывая изложенное, на ВЛ без троса использование «легких» ОПН недопустимо, а рекомендуется использование сравнительно «тяжелых» ОПН с характеристиками $I_{п} \geq 1000$ А, что позволит в расчете на 100 км длины и 100 грозовых часов иметь «разумное» годовое число повреждений $N_{опн} \leq 0.5$ (при реальных длинах линий и числе грозовых часов речь идет о повреждении одного ОПН за несколько лет эксплуатации ВЛ).

Табл.3.6,а. Оценка по (3.4) годового числа повреждений ОПН при их установке во все три фазы каждой опоры одноцепной ВЛ 110 кВ без троса.

R_3 , Ом	$I_{п}$, А	D_{ϕ}	P_{ϕ} *)	D_o	P_o **)	$N_{опн}$, на 100 км и 100 час
10	500	0,5	0,0434	0,5	0,0048	2,41
	1000	0,5	0,0072	0,5	0,0002	0,37
	1500	0,5	0,0006	0,5	0,0000	0,03
30	500	0,5	0,0212	0,5	0,0252	2,32
	1000	0,5	0,0024	0,5	0,0040	0,32
	1500	0,5	0,0002	0,5	0,0000	0,01
100	500	0,5	0,0210	0,5	0,0438	3,24
	1000	0,5	0,0022	0,5	0,0070	0,46
	1500	0,5	0,0000	0,5	0,0012	0,06

*) значение по рис.3.18; **) значение по рис.3.19

Табл.3.6,б. Оценка по (3.4) годового числа повреждений ОПН при их установке во все три фазы каждой опоры одноцепной ВЛ 110 кВ с тросом.

R_3 , Ом	$I_{п}$, А	D_{ϕ}	P_{ϕ} *)	$(D_o \cdot P_o + D_T \cdot P_T)$ **)	$N_{опн}$, на 100 км и 100 час
10	500	0,005	0,0434	0	0,0217
	1000	0,005	0,0072	0	0,0036
	1500	0,005	0,0006	0	0,0003
30	500	0,005	0,0212	0	0,0106
	1000	0,005	0,0024	0	0,0012
	1500	0,005	0,0002	0	0,0001
100	500	0,005	0,0210	0	0,0105
	1000	0,005	0,0022	0	0,0011
	1500	0,005	0,0000	0	0,0000

*) значение по рис.3.18; **) значение по рис.3.20

Заключение

Исследования грозových перенапряжений на ВЛ различных классов номинального напряжения и конструкций опор, некоторые из которых проиллюстрированы здесь на примере ВЛ 110 кВ, позволили сделать ряд важных обобщающих выводов.

1. Разряды молнии приводят к отключениям ВЛ всех классов номинального напряжения 6-750 кВ.
2. Число грозových отключений ВЛ серьезно зависит от импульсной прочности изоляции ВЛ и сопротивления заземления опор, а также от факта наличия молниезащитных тросов, их числа и расположения относительно фаз.
3. Усиление изоляции, снижение сопротивления заземления опор, установка тросов над фазными проводами являются хорошими способами снижения числа грозových отключений ВЛ 35-750 кВ.
4. Для уменьшения числа грозových отключений ВЛ 6-10 кВ снижение сопротивления заземления опор малоэффективно, а установка тросов (над или под фазами) целесообразна лишь при одновременном применении изоляторов 6-10 кВ повышенной импульсной прочности.
5. Для уменьшения числа грозových отключений на опорах ВЛ 6-10 и 35-750 кВ могут устанавливаться специальные защитные аппараты.
6. Наиболее универсальным защитным аппаратом является ОПН, применение которого возможно на линиях всех классов напряжения вне зависимости от способа заземления нейтрали сети.
7. ОПН может использоваться в качестве основного или дополнительного средства снижения числа грозových отключений ВЛ. Например, ОПН может размещаться:
 - на опорах с повышенным сопротивлением заземления;
 - на высоких опорах с повышенной индуктивностью;
 - на часто поражаемых молнией опорах или участках трассы ВЛ;
 - на участках трассы ВЛ, не имеющих установленного троса;
 - на любых ВЛ, грозоупорность которых не удовлетворяет потребителя.
8. ОПН надежно защищает изоляцию на расстоянии не более 200-300 метров от места своей установки, а значит необходимое число ОПН сопоставимо с числом требующих защиты опор.
9. Вольтамперная характеристика ОПН (его остающееся напряжение) в рамках заданного класса напряжения слабо влияет на эффективность работы ОПН.
10. Для одноцепных ВЛ без троса установка ОПН на опоре рекомендуется:
 - в одну верхнюю фазу при треугольном расположении проводов;
 - во все три фазы при горизонтальном расположении проводов.
11. Для одноцепных ВЛ с тросом установка ОПН на опоре рекомендуется:
 - во все три фазы при треугольном расположении проводов;
 - в две крайние фазы при горизонтальном расположении проводов.
12. Для многоцепных ВЛ установка ОПН на опоре, как правило, рекомендуется только в фазы одной из двух цепей.

13. ОПН должен присоединяться к опоре ВЛ 6-750 кВ без каких-либо искровых промежутков через специальное устройство, называемое «универсальный отделитель» (УО). В сетях с эффективно- или глухозаземленной нейтралью присоединение ОПН допустимо с помощью обычного «отделителя».
14. Следующие вопросы применения ОПН на опорах ВЛ требуют технико-экономического обоснования, которое удобно проводить с использованием программного комплекса ЕМТР:
- принципиальная необходимость применения ОПН;
 - оптимальные места установки ОПН вдоль трассы ВЛ;
 - фазы ВЛ, которые следует защищать в первую очередь;
 - характеристики ОПН и, прежде всего, энергоемкость.
15. Энергоемкость ОПН во многом определяет его стоимость, а также риск его повреждения при грозовых процессах на ВЛ.
16. На требования к энергоемкости практически не влияют класс напряжения ВЛ и остающееся напряжение ОПН.
17. С ростом числа установленных на ВЛ тросов (0,1,2) и числа цепей (1,2,3,...) требования к энергоемкости снижаются.
18. Распространив результаты расчетов одноцепной ВЛ 110 кВ на другие классы напряжения и другое число цепей и тросов правомерно утверждать:
- для одноцепных ВЛ 6-750 кВ без троса достаточной будет энергоемкость ОПН, соответствующая току пропускной способности около 1000 А (3-й класс разряда линии по ГОСТ Р 52725-2007);
 - для одноцепных ВЛ 6-750 кВ с одним тросом достаточной будет энергоемкость ОПН, соответствующая току пропускной способности около 500 А (2-й класс разряда линии по ГОСТ Р 52725-2007);
 - для одноцепных ВЛ 6-750 кВ с двумя тросами или для многоцепных ВЛ 6-750 кВ указанные токи пропускной способности являются тем более достаточными.

Список использованных источников

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 320 с. –ISBN 5-9221-0082-3.
2. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. –2-е изд. –СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. –355 с.
3. 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.
4. Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Анализ токовых нагрузок ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на опорах воздушных линий//Электричество. –2000. – № 3. –с.2-6.
5. Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Повышение надежности эксплуатации изоляции воздушных линий при установке ОПН на опорах//Сборник материалов научно-технической конференции “Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производства, испытаний и применения ОПН”. –СПб.: АОТ “НИИ Электрокерамика“, 8-10 октября 2001. –с.118-122.
6. Крыжановский В.В., Новикова А.Н., О.В. Шмараго. Области рационального использования подвесных ОПН (ОПНЛ) для повышения грозозащиты ВЛ 110 и 220 кВ//Сборник материалов научно-технической конференции “Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производства, испытаний и применения ОПН”. –СПб.: АОТ “НИИ Электрокерамика“, 8-10 октября 2001. –с.108-113.
7. Гайворонский А.С., Клепиков А.В.. Разрядники подвешеного исполнения на основе нелинейных ZnO сопротивлений с внешним искровым промежутком на классы напряжения 110-500 кВ//Сборник трудов международной научно-технической конференции “Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния”. –Новосибирск, 15-19 сентября 2003.
8. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Использование ограничителей перенапряжений для защиты изоляции ВЛ от обратных перекрытий при ударах молнии в опору или грозозащитный трос//Сборник докладов научно-технической конференции “Интеграция науки и производства”: Доклад 3.06. –М., 26-27 мая 2004.
9. Халилов Ф.Х. Исследование технико-экономической обоснованности грозозащиты ВЛ с помощью ОПН//Сборник докладов 8-й научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности «ЭМС-2004». –СПб., 2004. –с.50-56.
10. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Подвесные ОПН для защиты изоляции ВЛ//Энергетик. – 2005. –№3. –с.21-25.
11. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Применение ОПН для защиты изоляции воздушных линий от грозовых перенапряжений//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.
12. Furukawa S., Usuda O., Isozaki T. Development and application of lightning arresters for transmission lines//IEEE Transactions on Power Delivery. –1989. –№4. –Vol.4. –pp.2121-2127.
13. McDermott T.E., Short T.A., Anderson J.G. Lightning protection of distribution lines//IEEE Transactions on Power Delivery. –1994. –№1. –Vol.9. –pp.138-146.
14. Kawamura T., Inoue A., Murusawa I. Experience and effectiveness of application of arresters to overhead transmission lines//CIGRE Session 1998, Report No. 33-301.
15. Demailly B., Maciela F., Tartier S. Installation of composite surge arresters on transmission line//CIGRE Session 2002, Report No. 33-203.
16. Zanetty L.C. Evaluation of line surge arrester failure rate for multiphase lightning stresses//IEEE Transaction on Power Delivery. –2003. –№3. –Vol.18. –pp.796-801.

17. 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.
18. J.G. Anderson., “ Lightning Performance of Transmission Lines,”. Chapter 12 of Transmission Lines Reference Book, 345 kV and. Above Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto,. California, 1982.
19. Куатов С.Г., Никитин Н.М., Целебровский Ю.В. Грозопоражения и грозозащита дальних линий электропередачи //Сборник трудов международной научно-технической конференции “Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния”. –Новосибирск, 15-19 сентября 2003. Том №2, с.233-240.
20. Гайворонский А.С., Карасюк К.В. Новые методические принципы оценки грозоупорности воздушных линий электропередачи высших классов напряжения//Научный вестник НГТУ. –1998. –№2(5). –с.9-32.
21. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения/под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. –М.: Энергоатомиздат, 1989. –767 с.
22. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ от грозовых перенапряжений. –М.: ОАО «РОСЭП», ОАО «ФСК ЕЭС», 2004.
23. Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д. Новая грозозащита линий электропередачи с помощью длинноискровых разрядников// Энергетик, № 3, 1997. –с.15-17.
24. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. Часть третья. Выпуск первый. «Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах». –М.: ГЭИ, 1959. –368с.
25. “Guide on EMC in Power Plants and Substations”. CIGRE Working Group 36.04, December 1997.
26. Г.А. Евдокунин. “Электрические системы и сети”. – СПб.: Издательство Сизова М.П., 2004.
27. Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. –М.: Энергоатомиздат, 2004.
28. 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.
29. ГОСТ Р 52725-2007. «Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические требования и методы испытаний». Введен с 1-го января 2008 г.
30. Дмитриев М.В. Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ. –СПб.: Изд-во “НИВА”, 2007. –60 с. ISBN 5-86456-081-2.
31. С.Heinrich, S.Hayeb, W.Kalkner. Degradation and restoration of metal oxide surge arresters // 10th International symposium on high voltage engineering ISH-97, Canada, 1997.
32. Дмитриев М.В. Методика выбора ОПН для защиты оборудования сетей 110-750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений: дис. канд. тех. наук: СПбГПУ, 2006, 248 стр. Фундаментальная библиотека.
33. EMTP Rule book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. Portland, Oregon 97208-3621, USA (www.emtp.org).
34. Дмитриев М.В. Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35-750 кВ и защита от них. –СПб.: Изд-во “НИВА”, 2008. –60 с. ISBN 5-86456-037-5.
35. 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.
36. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Параметры разряда молнии в задачах грозозащиты//Известия РАН: Энергетика». –2005. –№4. –с.54-61.

Основные характеристики ОПН

В технической документации используются большое число терминов и характеристик ОПН. Приведем лишь основные из них, получившие наибольшее распространение среди энергетиков (точные определения содержатся в [29]).

1. Характеристики сети, в которую устанавливается ОПН

Класс напряжения сети, кВ – действующее значение номинального междуфазного (линейного) напряжения трехфазной электрической сети, для установки в которую предназначен ОПН.

Способ заземления нейтрали является важной характеристикой сети, которую следует принимать во внимание при выборе параметров ОПН.

2. Характеристики ОПН, от которых зависит его надежная работа в сети под рабочим напряжением и при квазистационарных перенапряжениях

Наибольшее (длительно допустимое) рабочее напряжение ОПН, кВ – наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты $U_{нрo}$, которое неограниченно долго может быть приложено к ОПН (при напряжении большем, чем наибольшее рабочее, ток через ОПН начинает заметно возрастать, что может привести к перегреву и повреждению аппарата).

Номинальное напряжение ОПН, кВ – действующее значение напряжения промышленной частоты, которое ОПН в определенных условиях может выдержать в течение 10 секунд после воздействия на него импульсов тока с нормированными параметрами.

Характеристика «напряжение-время» ОПН – определяется как зависимость действующего значения выдерживаемого ОПН напряжения промышленной частоты от времени его приложения. Иногда указывается для случая с предварительным нагружением ОПН импульсами тока с нормируемыми параметрами, а иногда для случая без нагружения.

3. Характеристики ОПН, от которых зависит защищенность оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений

Остающееся напряжение ОПН, кВ – наибольшее значение напряжения на ОПН при протекании через него импульса тока указанного максимального значения и формы.

Остающееся напряжение определяется при импульсных токах стандартной формы.

Грозовой импульс тока формы 8/20 мкс – импульс тока, используемый для определения остающегося напряжения на ОПН в режиме ограничения грозовых перенапряжений.

Коммутационный импульс тока формы 30/60 мкс – импульс тока, используемый для определения остающегося напряжения на ОПН в режиме ограничения коммутационных перенапряжений.

Крутой импульс тока формы 1/10 мкс – импульс тока, используемый для определения остающегося напряжения на ОПН при большой скорости нарастания протекающего в нем импульсного тока.

4. Характеристики ОПН, от которых зависит его надежная работа при ограничении грозовых и коммутационных перенапряжений

Номинальный разрядный ток ОПН, кА – максимальное значение грозового импульса тока 8/20 мкс, используемое для классификации ОПН и характеризующее его свойства в режиме ограничения грозовых перенапряжений.

Импульс большого тока, кА – максимальное значение грозового импульса тока 4/10 мкс, используемое для оценки устойчивости ОПН к прямым ударам молнии.

Ток пропускной способности (импульс тока большой длительности), А – максимальное значение $I_{п}$ прямоугольного импульса тока длительностью не менее 2000 мкс, используемое для классификации ОПН и характеризующее его способность рассеивать энергию коммутационных перенапряжений.

Рассеиваемая (поглощаемая) энергия, кДж – рассеиваемая ОПН энергия, полученная им при приложении одного импульса тока пропускной способности $I_{п}$ в процессе испытаний ОПН (иногда указывается энергия двух импульсов тока пропускной способности).

Удельная рассеиваемая (поглощаемая) энергия (энергоемкость), кДж/кВ – рассеиваемая ограничителем энергия $W_{уд}$ одного импульса (иногда – двух импульсов) тока пропускной способности $I_{п}$, отнесенная к наибольшему рабочему напряжению ОПН (иногда, к номинальному напряжению ОПН), полученная в процессе испытаний ОПН, используемая для классификации ОПН и характеризующая его способность рассеивать энергию коммутационных перенапряжений.

О заводе энергозащитных устройств

Завод энергозащитных устройств – одно из ведущих предприятий России по производству энергозащитного оборудования. Мы производим ограничители перенапряжений всех типов, для всех классов сетей и во всех видах изоляции, используя нелинейные элементы (варисторы) собственного изготовления. Ежегодно завод выпускает более 1 миллиона варисторов, что обеспечивает годовой выпуск более 50 тысяч ОПН классов 3-220 кВ, в том числе для сетей ФСК и МРСК, для нефтяной и газовой промышленности, для атомной энергетики и железнодорожного транспорта.

Широкий комплекс проведенных в ЗАО "ЗЭУ" испытаний и исследований варисторов разных производителей, а также опыт их применения, показал, что характеристики варисторов даже ведущих мировых фирм могут существенным образом меняться из-за нарушений условий хранения в процессе многомесячной транспортировки от изготовителя к отечественному потребителю, комплектуемому из этих варисторов ограничители перенапряжений. Это обстоятельство вынудило ЗАО "ЗЭУ" разработать технологию и организовать собственное производство варисторов.

Уникальное для России промышленное производство варисторов "ЗЭУ", организованное под Санкт-Петербургом, позволило:

- отказаться от закупок за рубежом;
- обеспечить высокое качество и стабильность характеристик ОПН "ЗЭУ";
- сделать простым и удобным посещение нашего предприятия ведущими специалистами отрасли и, следовательно, организовать для них возможность знакомства со всеми этапами цикла производства ОПН "ЗЭУ".

Руководство завода уделяет серьезное внимание качеству выпускаемой продукции. Среди мер, направленных на обеспечение высокого качества, следует отметить:

- внедрение действующей на предприятии системы менеджмента качества продукции, отвечающей требованиям ISO 9001;
- оснащение цехов завода испытательными установками, обеспечивающими возможность контроля качества продукции;
- введение входного контроля качества всех используемых материалов;
- контроль всех основных технологических операций производства и сборки;
- 100% выходной контроль выпускаемых ОПН.

Признанию продукции завода у потребителей способствует не только ее качество, но и комплексный подход "ЗЭУ" к решению задачи защиты от перенапряжений. Завод предлагает:

- варисторы и ограничители перенапряжений ОПН всех типов;
- оборудование для диагностики ОПН в эксплуатации;
- простые и универсальные отделители (УО) для установки совместно с ОПН;
- научные разработки и проектные решения по защите от перенапряжений;
- семинары и лекции по вопросам защиты от перенапряжений;
- исследования в области электроэнергетики на договорной основе.

ЗАО «Завод энергозащитных устройств»
Россия, 197342, Санкт-Петербург,
Красногвардейский пер., д.8
тел.(812) 295-15-01, 438-10-86
факс.(812) 327-64-15
www.zeu.ru
e-mail: opn@zeu.ru